



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

# **ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS QUE SOPORTA UN AEROGENERADOR**

**Autor:**

**Perandones De Paz, Óscar**

**Tutora:**

**Requejo Arranz, María Estrella  
Departamento de Construcciones  
Arquitectónicas, Ingeniería del  
Terreno y Mecánica de los Medios  
Continuos y Teoría de Estructuras.**

**Valladolid, Enero de 2023.**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS QUE SOPORTA UN AEROGENERADOR



## RESUMEN

Hoy en día ha cobrado una especial importancia en nuestras vidas la manera que tenemos de obtener energía, por ello una de las fuentes de energía renovable más utilizada es la energía eólica. Prácticamente cualquier ingeniero debe conocer en qué consiste este método y la infraestructura utilizada. Este trabajo consiste en analizar desde el punto de vista de la ingeniería, la infraestructura de un aerogenerador y su diseño óptimo. Elegir la mejor localización para instalarlo y analizar todas las fuerzas a las que debe hacer frente una estructura de estas características. Una torre eólica no es una estructura al uso comercial debido a su tamaño, por ello se debe analizar con métodos específicos los cuales han sido estudiados durante las asignaturas de este grado. También cobra especial importancia la interacción sólido-fluido.

**Palabras Clave:** Energías renovables, Análisis de estructuras, Torre eólica, Viento, Esfuerzos.



## **ABSTRACT**

Nowadays, the way we obtain energy has reached special importance in our lives, so that one of the most widely used renewable energy sources today is wind energy. Almost any engineer should know what this method consists of, and the infrastructure used. This project consists of analyzing, from the point of view of engineering, the infrastructure of a wind turbine and optimizing its design. Choosing the best location to install it and analyzing all the forces that a structure with these characteristics must deal of. A wind tower is not a structure for commercial use due to its size, therefore it must be analyzed with specific methods which have been studied during the subjects of this degree. The solid-fluid interaction that exists between the tower and the wind takes special importance.

**Keywords:** Renewable energies, Structural analysis, Wind Tower, Wind, Stress.



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS QUE SOPORTA UN AEROGENERADOR



## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO	12
1.2. OBJETIVOS	13
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. ENERGÍAS RENOVABLES	14
2.1. INTRODUCCIÓN	14
2.2. TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES	16
2.2.1. ENERGÍA SOLAR	16
2.2.2. ENERGÍA HIDRÁULICA	22
2.2.3. BIOMASA	23
2.2.4. GEOTÉRMICA	25
2.2.5. EÓLICA	26
3. ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN	32
4. AEROGENERADOR ELEGIDO	35
4.1. JUSTIFICACIÓN.	35
4.2. FICHA TÉCNICA	36
4.3. GÓNDOLA	38
4.4. DIMENSIONES Y DATOS ESPECIFICADOS	39
4.5. ELEMENTO PRINCIPAL DE ESTUDIO: TORRE	39
4.6. MONTAJE DE LOS MÓDULOS DE LA TORRE	40
5. ESTADO DE CARGAS	41
5.1. MODELO DE VIENTO	41
5.1.1. TIPOS DE VIENTO	41
5.1.2. PERFIL VIENTO MEDIO	43
5.1.3. CONDICIONES VIENTO EXTREMO	47
5.2. CARGAS ESTÁTICAS	48
5.2.1 PESO SUBCONJUNTO GÓNDOLA/PALAS	48
5.2.2 PESO TORRE	48
5.3. CARGAS AERODINÁMICAS	49



5.3.1. FUERZA DE EMPUJE SOBRE CONJUNTO PALAS-TURBINA.	49
5.3.2. FUERZA DE RESISTENCIA AERODINÁMICA SOBRE LA TORRE.	53
6. ESTUDIO ANÁLITICO SIMPLIFICADO DE ESFUERZOS EN LA TORRE.	59
6.2. ESTADO DE CARGAS EN EL MODELO	59
6.2. ESTUDIO DE RESISTENCIA Y FLECHA MÁXIMA.	67
6.3. DIMENSIONADO	73
6.4. RESULTADOS Y COMPROBACIONES FINALES	85
6.5. MATERIAL DE LA TORRE	90
7. POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE ESTUDIO	91
CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	97
ANEXO 1: CÁLCULOS	97
ANEXO 2: AMPLIACIÓN DE LA TURBULENCIA EN UNA TORRE EÓLICA.	101
TURBULENCIAS EN TORNO A LOS AEROGENERADORES	101
CARACTERÍSTICAS DE UN FLUJO TURBULENTO	101
CALLE DE TORBELLINOS DE VON KÁRMAN	103



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema instalación solar fotovoltaica.....	18
Ilustración 2: Colector solar esquema .....	19
Ilustración 3: Colectores solares .....	19
Ilustración 4: Colectores solares .....	20
Ilustración 5: Espejos solares .....	21
Ilustración 6: Torre de acumulación solar de muy alta temperatura. ....	21
Ilustración 7: Pantano y presa .....	23
Ilustración 8: Clasificación de instalaciones eólicas de acuerdo con la potencia generada. .....	27
Ilustración 9: Clasificación de aerogeneradores en función de la orientación del rotor respecto al viento.....	28
Ilustración 10: Clasificación aerogeneradores de eje vertical.....	31
Ilustración 11: Situación geográfica del emplazamiento .....	33
Ilustración 12: Mapa de viento en España.....	34
Ilustración 13: Detalle de rotor y góndola de Acciona. ....	35
Ilustración 14: Esquema de góndola .....	38
Ilustración 15: Detalle de bridas entre módulos del tronco de torre.....	40
Ilustración 16: Detalle de anclajes y pernos de los módulos de la torre.....	40
Ilustración 17: Gráficas de perfil de velocidad de viento, exponencial y logarítmico. ....	43
Ilustración 18: Gradiente de viento en función de la rugosidad del terreno.....	45
Ilustración 19: Perfil de velocidad para el viento de estudio, en función de la cota. ....	46
Ilustración 20: Tubo de corriente de viento.....	49
Ilustración 21: Geometría del tubo de corriente.....	50
Ilustración 22: Coeficiente de potencia límite de Betz para cada rotor.....	52
Ilustración 23: Perfil de viento incidente en el aerogenerador.....	53
Ilustración 24: Desprendimiento de capa límite de un fluido laminar al enfrentarse a un cilindro liso.....	54
Ilustración 25: Gráfica obtención coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.....	56
Ilustración 26: Estado de cargas en el aerogenerador en estudio.....	60
Ilustración 27: CTE coeficientes de ponderación .....	65
Ilustración 28: CTE coeficientes de ponderación .....	65
Ilustración 29: Criterio de Tensión equivalente de Von Mises y de Tresca .....	68
Ilustración 30: Prontuario viga empotrada libre.....	71
Ilustración 31: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector sobre la torre.....	75
Ilustración 32: Datos físico-geométricos de la sección de la torre para un $D=5000\text{mm}$ y $e=50\text{mm}$ . ....	76
Ilustración 33: Gráficas de tensiones normales debidas al axil y al flector en la cota $y= D$ para un $D=5000\text{mm}$ y $e=50\text{mm}$ . ....	77
Ilustración 34: Diagramas de giros y desplazamientos de la torre a estudiar. ....	78
Ilustración 35: Datos físico-geométricos de la sección de la torre para un $D=5000\text{mm}$ y $e=25\text{mm}$ .....	79



Ilustración 36: Gráficas de tensiones normales debidas al axil y al flector en la cota $y= D$ para un $D=5000\text{mm}$ y $e=25\text{mm}$ .....	79
Ilustración 37: Diagramas de giros y desplazamientos de la torre a estudiar. ....	80
Ilustración 38: Datos físico-geométricos de la sección de la torre para un $D=5000\text{mm}$ y $e=12,5\text{mm}$ .....	81
Ilustración 39: Gráficas de tensiones normales debidas al axil y al flector en la cota $y= D$ para un $D=5000\text{mm}$ y $e=12,5\text{mm}$ .....	81
Ilustración 40: Diagramas de giros y desplazamientos de la torre a estudiar. ....	82
Ilustración 41: Rebanada de estudio con momento flector, esfuerzo axil y cortante.....	84
Ilustración 42: Sumatorio de tensiones normales debidas al momento flector y al esfuerzo axil y tensión tangencial debida al cortante. ....	88
Ilustración 43: CTE-SE-A Tipos de aceros.....	89



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de tipo de viento según IEC, International Electrotechnical Commission .....	42
Tabla 2: Resultados de tensión máx. para distintos diámetros y espesores .....	83
Tabla 3: Resultados de máximo desplazamiento para distintos espesores y diámetros .....	83
Tabla 4: Resultados finales de MD SOLIDS para un $D=5000\text{mm}$ y espesor $e=50\text{mm}$ .....	85
Tabla 5: Resultados finales manuales para un $D=5000\text{mm}$ y espesor $e=50\text{mm}$ .....	86



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS QUE SOPORTA UN AEROGENERADOR



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

Esta idea de trabajo surgió a raíz de las prácticas de empresa. Esas prácticas se realizaron en una conocida empresa energética en España.

Durante ese tiempo me llamó especialmente la atención el sector de las energías renovables al comprobar que se ponían en práctica bastantes conocimientos que se han visto durante la carrera. Además, es un ámbito muy interesante actualmente y lo va a ser durante los próximos años para iniciar una carrera profesional. Todas las energías renovables son el futuro porque están sustituyendo a las fuentes de energía tradicionales. Es la manera más limpia de producir energía con bajas emisiones. Todavía este tipo de energías no están completamente desarrolladas, pues en términos de eficiencia energética y aprovechamiento de los recursos naturales queda un largo camino.

De esta forma, este trabajo va a combinar conceptos relacionados con las energías renovables y eficiencia energética con el análisis y resistencia de estructuras estudiado en varias asignaturas. Así como la interacción de sólidos con fluidos.

Previamente al inicio de este proyecto, se realizó una pequeña búsqueda de proyectos de fin de carrera relacionados con este análisis estructural y el enfoque de este mismo trabajo, así como sus ampliaciones y anexos para garantizar la exclusividad personal del mismo.

Por todo ello mi ilusión al hacer este trabajo de fin de carrera para poner en práctica los conocimientos de ingeniería adquiridos durante mi paso por la universidad y así profundizar e investigar más en algunos aspectos de este sector de cara a mi futuro profesional.



## 1.2. OBJETIVOS

Con este trabajo se intenta realizar un estudio técnico de la forma más profesional considerando los aspectos más importantes de un trabajo de ingeniería. El principal objetivo es poner en práctica conocimientos, destrezas y aptitudes obtenidas al cursar el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, pero también se me ofrece la oportunidad de ampliar por cuenta propia, conocimientos relativos a las energías renovables y el análisis de estructuras con cargas mixtas (variables y estáticas) y la interacción entre sólido y fluido.

Para ello se llevará a cabo una labor de investigación y estudio personal, así como preguntas a personas entendidas en este sector de las estructuras, energías renovables y profesores de la universidad que me han impartido materias relacionadas.

Con todo ello al finalizar este trabajo y con él los estudios de grado espero haber adquirido una visión más profunda de este sector de la Ingeniería.

## 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se pretende estudiar la viabilidad técnica de un aerogenerador para una localización seleccionada. Para ello se van a estudiar las fuerzas y cargas que intervienen, así como los esfuerzos que sufre la estructura del aerogenerador.

Se pondrá en situación con una introducción sobre las energías renovables, en concreto la eólica y su funcionamiento, para posteriormente definir cada fuerza y esfuerzo a los que se debe hacer frente.

El problema se simplificará estudiando estos esfuerzos únicamente sobre el poste del aerogenerador y el apoyo. Se llevarán a cabo los diferentes análisis, cálculos y simulaciones para comprobar su viabilidad estructural. Se estudiarán modelos para representar cada elemento físico que interviene.

Finalmente se obtendrán unos resultados para extraer las conclusiones pertinentes, se propondrá un estudio de turbulencia a parte y este trabajo finalizará con una propuesta de posibles vías de estudio.

## 2. ENERGÍAS RENOVABLES

### 2.1. INTRODUCCIÓN

#### ¿Qué son las energías renovables?

Se conocen como energías renovables aquellas derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse. Un ejemplo de estas fuentes son la luz solar y el viento; que además se renuevan continuamente. La principal característica de las fuentes de energía renovable es su abundancia y las encontramos en cualquier entorno.

Por el contrario, los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, constituyen fuentes de energía no renovables que tardan cientos de millones de años en formarse. Los combustibles fósiles producen la energía al quemarse, lo que provoca emisiones dañinas en forma de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono.

La generación de energías renovables produce muchas menos emisiones que la quema de combustibles fósiles. Una transición de los combustibles fósiles, los cuales representan en la actualidad la mayor parte de las emisiones, a energías renovables resulta fundamental para abordar la crisis producida por el cambio climático.

Hoy en día, las energías renovables son más baratas en la mayoría de los países y generan tres veces más puestos de trabajo que los combustibles fósiles.

#### VENTAJAS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

- Inagotables, son energías procedentes de fuentes ilimitadas.
- Proceden de recursos naturales, son limpias, no producen sustancias contaminantes.
- Estimulan el autoconsumo, haciendo que los edificios o incluso pueblos o pequeñas ciudades sean autosuficientes energéticamente.
- Son seguras, la producción de electricidad no conlleva procesos contaminantes ni peligrosos para el ser humano.
- Están presentes en todo el mundo, sus fuentes naturales existen en todo el mundo y no son propiedad de ningún país como ocurre con el gas o petróleo.



## INCONVENIENTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

- Son discontinuas, dependientes de fenómenos naturales y atmosféricos, dependen de la aleatoriedad de la atmósfera, y no garantizan un suministro constante de energía.
- Inversiones económicas fuertes.
- Impacto visual en ciudades y paisajes naturales.
- En ocasiones la fabricación de los equipos necesarios conlleva procesos contaminantes.

## 2.2. TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES

### 2.2.1. ENERGÍA SOLAR

#### **¿Qué es la energía solar?**

La energía solar es aquella que se obtiene a partir del sol en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta). Mediante la instalación de paneles solares o colectores, se puede utilizar para obtener energía térmica (sistema fototérmico) o para generar electricidad (sistema fotovoltaico).

Así existen dos tipos de energía solar: La energía solar fotovoltaica, utilizada para producir electricidad; La energía solar térmica, utilizada para calentar agua. También existe otra forma de energía solar llamada energía solar pasiva, que puede aprovechar de forma indirecta la luz del sol y el calor a través de ventanas, muros... Este tipo de energía solar está más relacionada con la eficiencia energética.

#### **SOLAR FOTOVOLTAICA**

Este tipo de energía consiste en la transformación directa de la radiación que transmite el Sol en la energía eléctrica. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores que forman los módulos fotovoltaicos.

La mayor parte de los paneles fotovoltaicos están hechos a base de silicio como elemento principal, e incluyen también otros componentes como el Boro o el Galio. La fabricación es un proceso complejo de cristalización del Silicio y la combinación con los otros componentes formando obleas multicapas que se utilizan para la formación de células. La conexión de las distintas células que forman un panel puede hacerse en serie o en paralelo.

Cuando la luz del sol incide en una de las caras de la célula solar, estimula el movimiento de los electrones entre las capas dando lugar así a la corriente eléctrica. Esta generación se produce en corriente continua que posteriormente deberá convertirse en alterna mediante un inversor.



En la búsqueda de perfeccionar y bajar los costes para el aprovechamiento de la energía fotovoltaica, actualmente se están investigando otros materiales de mayor rendimiento y más económicos.

### **APLICACIONES:**

El uso de las instalaciones de energía solar fotovoltaicas para la generación de electricidad a partir de la radiación solar tiene dos vertientes. Este tipo de instalación se puede aplicar a gran escala para la generación y distribución o a pequeña escala para el consumo y autoconsumo residencial, refugios etc.

- **Central fotovoltaica:** toda la energía producida por los paneles se vierte a la red eléctrica.
- **Generador con autoconsumo:** parte de la electricidad generada es consumida por el propio productor (en una vivienda, por ejemplo) y el resto se vierte a la red. Al mismo tiempo, el productor toma de la red la energía necesaria para cubrir su demanda cuando la unidad no le suministra la suficiente.

### **INSTALACIÓN:**

Estas instalaciones con conexión a la red cuentan con tres elementos básicos, algunos ya citados anteriormente:

- **Paneles fotovoltaicos:** se trata de grupos de celdas fotovoltaicas montadas entre capas de silicio que captan la radiación solar y transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones).
- **Inversores:** convierten la corriente eléctrica continua que producen los paneles en corriente alterna, apta para el consumo.
- **Transformadores:** la corriente alterna generada por los inversores es de baja tensión (380-800 V), por lo que se utiliza un transformador para elevarla a media tensión (hasta 36 kV) si fuese necesario. En el caso del autoconsumo no haría falta.

Por otra parte, las instalaciones no conectadas a la red operan *en isla* y suelen encontrarse en lugares remotos y explotaciones agrícolas para satisfacer demandas de iluminación, servir de apoyo a las telecomunicaciones y alimentar

sistemas de riego. Estas plantas aisladas requieren dos elementos adicionales para funcionar:

- **Baterías:** encargadas de almacenar la energía producida por los paneles y no demandada en ese instante para cuando sea necesario.
- **Reguladores:** protegen la batería contra sobrecargas y previenen un uso ineficiente de la misma.

## ¿CÓMO FUNCIONAN LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS?



Ilustración 1: Esquema instalación solar fotovoltaica.

## **SOLAR TÉRMICA**

La energía solar térmica o energía termosolar consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar alimentos o para la producción de agua caliente destinada al consumo doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción o para producción de energía mecánica y, a partir de ella, de energía eléctrica.

Los colectores de energía solar térmica están clasificados como colectores de baja, media y alta temperatura.

Los colectores de baja temperatura, generalmente, son placas planas usadas para calentar agua. Los colectores de temperatura media también, usualmente, son placas planas usadas para calentar agua o aire para usos residenciales o comerciales.

Los colectores de alta temperatura concentran la luz solar usando espejos o lentes y, generalmente, son usados para la producción de energía eléctrica. La energía solar térmica es diferente y mucho más eficiente que la energía solar fotovoltaica, la que convierte la energía solar directamente en electricidad. Mientras que las instalaciones generadoras proporcionan sólo 600 megavatios de energía solar térmica a nivel mundial a octubre de 2009, otras centrales están bajo construcción por otros 400 megavatios y se están desarrollando otros proyectos de energía termosolar de concentración por un total de 14 gigavatios.

- **COLECTORES DE BAJA TEMPERATURA:**

Las instalaciones de este tipo que más se utilizan son para ACS, usos domésticos, piscinas... Son para usos domésticos donde no se requiere demasiada potencia calorífica.

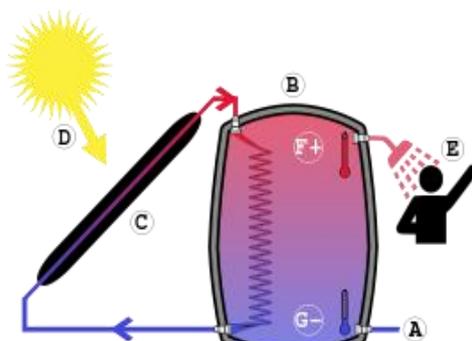


Ilustración 2: Colector solar esquema



Ilustración 3: Colectores solares



- **COLECTORES DE MEDIA TEMPERATURA:**

Las instalaciones de temperatura media pueden usar varios diseños, los diseños más comunes son normalmente para usos y aplicaciones industriales en un determinado momento del proceso, secados, cocciones, hornos, destilación...



*Ilustración 4: Colectores solares*

- **COLECTORES DE ALTA TEMPERATURA:**

Este tipo de instalaciones son para producir energía a gran escala, suelen ser centrales o plantas.

La energía termosolar de concentración es un tipo de energía solar térmica que utiliza espejos o lentes para concentrar una gran cantidad de luz solar sobre una superficie pequeña. La energía eléctrica es producida cuando la luz concentrada es convertida en calor, que impulsa un térmico, normalmente una turbina de vapor conectado a un generador de electricidad.

Las tecnologías de concentración existen en cuatro formas comunes: cilíndrico parabólico, discos Stirling, reflector Fresnel lineal compacto y torre de energía solar. Aunque simples, estos concentradores solares están lejos de la capacidad de concentración máxima.



*Ilustración 5: Espejos solares*



*Ilustración 6: Torre de acumulación solar de muy alta temperatura.*



## 2.2.2. ENERGÍA HIDRÁULICA

### ¿Qué es la energía hidráulica?

La energía hidráulica es aquella que aprovecha el movimiento del agua para generar energía. Su obtención se debe al aprovechamiento de la energía cinética y potencial de los saltos de agua o ríos. Las centrales hidráulicas pueden ser a pie de presa o de agua fluyente.

### GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA

La obtención de la energía hidráulica puede variar, puesto que el movimiento del agua se puede obtener de distintas formas.

#### **1. Construcción de presas**

Es uno de los métodos más corrientes y con el que se suele obtener en la mayor parte de las ocasiones la electricidad. La potencia dependerá del caudal y del salto del agua, -la altura desde la que cae- la propia caída del agua hace que la turbina se mueva y conectada a un transformador genera la corriente eléctrica.

Dentro de la modalidad de generación de energía mediante la construcción de presas existe la posibilidad de controlar el caudal mediante un sistema de bombeo. Este método satisface la demanda en función de los picos de consumo que se experimenten. De tal forma, que se libera el agua cuando es necesario producir energía. El principal problema de estos sistemas es que modifican el curso natural del agua con el impacto medioambiental que conlleva.

#### **2. Corrientes de ríos**

Otro de los métodos utilizados para la generación de electricidad es aprovechar las corrientes de los ríos: la propia corriente es la encargada de mover la turbina. En este caso, y a diferencia de la anterior modalidad, uno de los inconvenientes es la capacidad de controlar el flujo del agua.

#### **3. Mareas**

En este caso, la llamada energía mareomotriz es aquella que aprovecha el movimiento de las mareas para generar electricidad. El movimiento de las mareas es altamente predecible, por lo que en los lugares donde la pleamar y bajamar oscilan en gran magnitud puede ser una alternativa.

#### **4. Olas**



Es conocida como energía undimotriz. Es el aprovechamiento energético producido por el movimiento ondulatorio de la superficie del agua del mar. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, de ahí que sea muy irregular. Para solucionar este problema, se han desarrollado múltiples dispositivos o convertidores de energías del mar según el principio de captación del dispositivo. Se trata de una de las energías renovables más prometedoras.



*Ilustración 7: Pantano y presa*

### 2.2.3. BIOMASA

**¿Qué es la energía de biomasa?**



La energía de biomasa es una energía obtenida a partir de la combustión de materia orgánica. Esa biomasa se puede ser originada por los diferentes procesos biológicos que se dan en el día a día. Por ejemplo, unas materias primas muy utilizadas pueden ser: excrementos de animales en ganaderías, residuos de las podas de árboles, ciertos cereales, restos de aceite industrial, etcétera.

En España, el consumo de energía de biomasa apenas supone un 1% del total, pero su potencial es muy importante. Sólo Suecia y Finlandia cuentan con mayores recursos de biomasa forestal, además de ser el principal productor de ganado porcino en Europa (se generan al año más de 50 millones de toneladas de residuos orgánicos). Todo este material puede repercutir de manera muy positiva en la creación de energía sostenible.

Algunas de las centrales de biomasa en España más importantes se encuentran en Cartagena, las localidades madrileñas de Pinto y Alcalá de Henares, Navarra y Segovia. En estas centrales se produce electricidad, calefacción o biocombustibles y sus aditivos.

### *¿RENOVABLE O NO RENOVABLE?*

Muchos os haréis la pregunta de si la energía de biomasa es realmente renovable o no, ya que puede dar la sensación de que algunos materiales de los que obtenemos energía no lo parecen. La respuesta a la pregunta es sí, la energía de biomasa es renovable, además de limpia. Por lo tanto, estamos ante una forma de generación de energía muy válida y que debemos tener en cuenta como alternativa a los métodos con combustibles fósiles. Eso sí, se considera renovable si la generación de biomasa es controlada y a partir de maleza, podas, replantaciones... Además de usarla como energía también ayuda a cuidar los montes.

El factor esencial que lo diferencia es **la sostenibilidad**.

Pongamos el ejemplo de los bosques. Utilizamos leña para producir energía de biomasa que nos proporcione calor. Como es lógico, estos entornos necesitan su tiempo para la regeneración. Si la producción se adelanta a los plazos establecidos, tendremos un problema de abastecimiento, los precios se encarecen y la contaminación repercutirá directamente sobre el medio ambiente.

## 2.2.4. GEOTÉRMICA

### ¿Qué es la energía geotérmica?

La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o mediante conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de agua subterránea y rocas.

### FUNCIONAMIENTO

1. **Perforación.** Antes de poner en funcionamiento cualquier sistema de energía geotérmica es necesario localizar y perforar la zona adecuada. Para ello es necesario contar con estudios geológicos y mineros, así como con un equipamiento tecnológico adecuado y personal altamente cualificado.
2. **Instalación.** Después de perforar es necesario introducir una o varias sondas geotérmicas. Sondas en forma de tubería selladas, fabricadas con poliuretano y rellenas de agua o líquido anticongelante. Su función es realizar el intercambio de calor, con lo que una vez son introducidas en la zona más profunda, ascienden de nuevo a alta temperaturas y el calor es recogido en la superficie.
3. **Producción:** para la obtención de electricidad, es necesario que haya en el exterior una **planta geotérmica** que recoja el vapor y lo convierta en energía mecánica gracias a una turbina. Incluso puede suministrarse energía geotérmica de forma directa a viviendas, conectando directamente el calor obtenido con una red de distrito que caliente de forma directa a los edificios. Gracias a un convertidor, además, es posible generar el efecto contrario y ofrecer aire frío en verano.

## 2.2.5. EÓLICA

### ¿Qué es la energía eólica?

La energía eólica es aquella que se obtiene a partir de la fuerza del viento. ¿Cómo? A través de un aerogenerador que transforma la energía cinética de las corrientes de aire en energía eléctrica. El proceso de extracción se realiza principalmente gracias al rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica, y al generador, que transforma dicha energía mecánica en eléctrica. Hablamos de una energía renovable, eficiente, madura y segura, clave para la transición energética y la descarbonización de la economía.

### **ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA**

Según la AEE (Asociación Empresarial Eólica) Con 28.139 MW de potencia acumulada, la energía eólica ha sido la primera fuente de generación eléctrica en España en 2021, superando el 23% de cobertura de la demanda.

Todo apunta a que los resultados de 2022 serán similares, consolidándose como la tecnología que más electricidad genera en nuestro país. Los más de 21.500 aerogeneradores instalados en España generaron 60.485 GWh eólicos en 2021, un 10% más que en 2020.

Durante 2021 se han instalado 842.61 MW eólicos, cifra relevante, pero muy por debajo de los 2,2 GW anuales que sería necesario instalar hasta 2030 para lograr los objetivos marcados en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), el cual persigue una reducción de un 23% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990, lo que implica un incremento de renovables y, en particular, duplicar la potencia eólica.

España es el quinto país del mundo por potencia eólica instalada, tras China, Estados Unidos, Alemania e India, y el segundo en Europa por detrás de Alemania.

## TIPOS DE AEROGENERADORES

Todos los aerogeneradores se pueden clasificar en base a varios criterios, siendo los más habituales los siguientes:

- **De acuerdo con la potencia generada**

Existen tres tipos de aerogeneradores en función de la potencia generada, de baja potencia (doméstico), de media potencia (Industrial) y de alta potencia (generación).

La potencia, en vatios por unidad de superficie, se puede expresar como:

$$W = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Siendo ( $\rho$ ) la densidad del aire y ( $v$ ) la velocidad del aire.

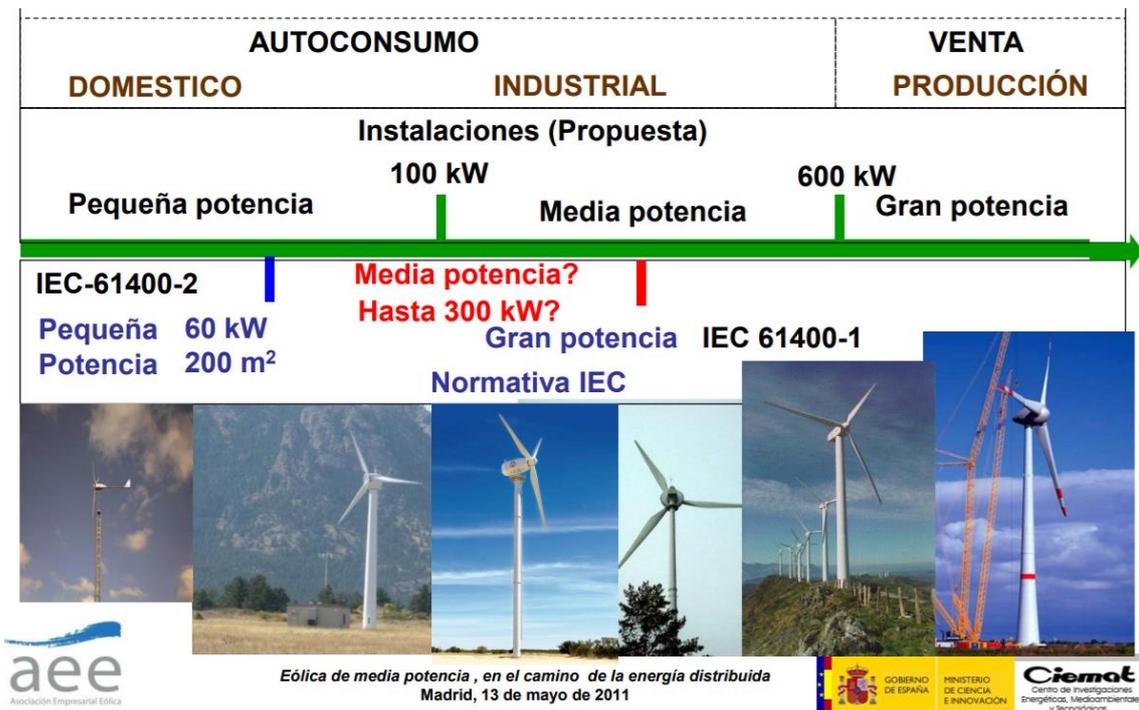


Ilustración 8: Clasificación de instalaciones eólicas de acuerdo con la potencia generada.

En la ilustración anterior se aprecia la clasificación según la potencia generada, siendo de 0-100kW los de baja potencia o uso doméstico, de 100

kW a 600 kW de media potencia que permite suministrar energía a grandes factorías e instalaciones industriales además de aportar energía a la red eléctrica y por último de 600 kW en adelante se encuentran los aerogeneradores de alta potencia cuyo único fin es la producción eléctrica a gran escala para suministrar a la red de transporte o de distribución.

- **De acuerdo con la orientación al viento**

Se trata de identificar la posición del rotor del aerogenerador en función de la dirección del viento, existe orientación a barlovento y a sotavento:

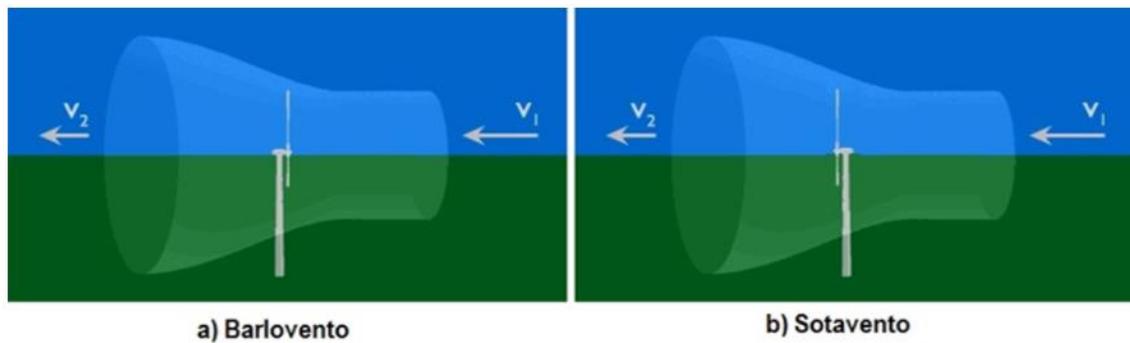


Ilustración 9: Clasificación de aerogeneradores en función de la orientación del rotor respecto al viento.

### Máquinas con rotor a barlovento

Las máquinas con rotor a barlovento tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre. Con mucho, la gran mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño. Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.

El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre (como muchos fabricantes han averiguado de su coste). Además, una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.



## **Máquinas con rotor a sotavento**

Las máquinas con rotor a sotavento tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre. La ventaja teórica que tienen es que pueden ser contruidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. ¿Cómo distorsiona los cables si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo, si no dispone de un mecanismo de orientación? (Los anillos rozantes o los colectores mecánicos no son muy buena idea si se está trabajando con corrientes de 1000 amperios).

Una ventaja más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica estructural de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que le quitarán parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

- ***De acuerdo con la dirección del eje***

### **Aerogeneradores de eje horizontal**

La mayor parte de la tecnología descrita en estas páginas se refiere a aerogeneradores de eje horizontal (o "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines").

La razón es simple: todos los aerogeneradores comerciales conectados a la red se construyen actualmente con un rotor tipo hélice de eje horizontal (es decir, de eje principal horizontal).

Por supuesto, la finalidad del rotor es la de convertir el movimiento lineal del viento en energía rotacional que pueda ser utilizada para hacer funcionar el generador. El mismo principio básico es el que se utiliza en las modernas turbinas hidráulicas, en las que la corriente de agua es paralela al eje de rotación de los álabes de la turbina.

Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal son:

- a) *Máquinas que generan un movimiento alternativo, que se utilizan para el bombeo de agua.*
- b) *Máquinas multipala.*
- c) *Hélices con palas pivotantes (ángulo de ataque variable).*
- d) *Hélices con palas alabeadas.*

### **Aerogeneradores de eje vertical**

En este tipo de aerogeneradores las palas giran en torno a un eje central vertical, presentando por lo tanto tres ventajas fundamentales con respecto a los de eje horizontal, los cuales son utilizados de forma más asidua:

- La sujeción de las palas es de fácil diseño y ejecución.
- No precisan sistema de orientación para captar la energía del viento.
- Fácil ubicación del tren de potencia, generador y transformador, a nivel del suelo.

De forma general podemos decir que el rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical se encuentra por debajo de la mitad que el correspondiente a aerogeneradores de eje horizontal, hecho que ha dirigido la industria al desarrollo de esto últimos frente a los primeros. Estos son los principales de este tipo:

- **Tipo DARRIEUS:**

Consta de dos o más palas dispuestas según se muestra en la siguiente imagen. Empezando las palas en un extremo del eje y terminando en el otro siguiendo una forma característica.

En función de la forma de las palas se les llamará de una forma u otra. Su rendimiento y potencia serán prácticamente similares.

- **Tipo SAVONIUS:**

Aerogenerador que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.

- **Tipo GIROMILL:**



Aerogenerador que deriva del Darrieux; tiene entre 2 y 6 palas. El modelo Darrieux arranca mal, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa.

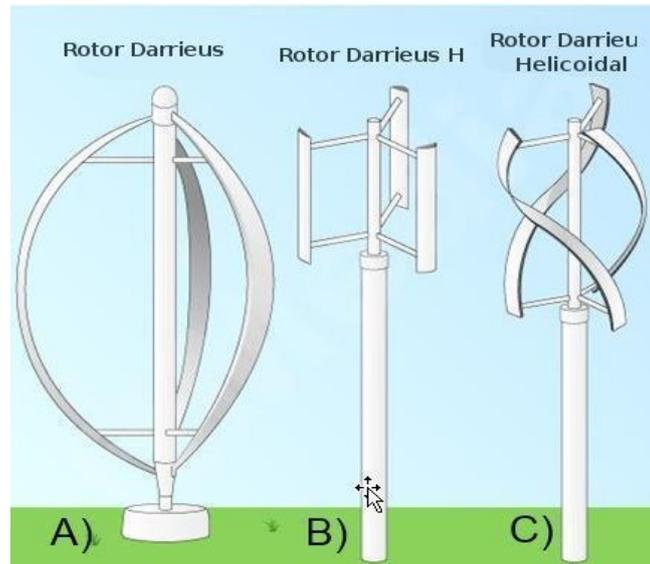


Ilustración 10: Clasificación aerogeneradores de eje vertical.

Los inconvenientes principales de este diseño son la necesidad de monitorización debida a que los perfiles aerodinámicos y la simetría de las palas no permiten el autoarranque. Otro inconveniente importante es la necesidad de utilizar tensores para garantizar la estabilidad estructural de la turbina.

### 3. ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN

Para llevar a cabo este trabajo, se ha elegido una localización específica teniendo en cuenta aspectos técnicos de viabilidad meteorológica, viabilidad económica y aspectos orográficos del terreno. Principalmente que no se encuentre cerca de edificaciones, bosques, entornos protegidos y demás supuestos controlados en la normativa. Es necesario tener una cantidad de viento media durante todo el año para que el rendimiento de la instalación sea el máximo posible.

Cuando se trata de colocar un aerogenerador el objetivo es obtener el máximo rendimiento. Antes de tomar la decisión de construir una turbina eólica en un sitio en particular, hay algunas preguntas críticas que hay que tener en cuenta: ¿Cuál es la velocidad media anual del viento en esta ubicación? ¿Cuáles son las ráfagas extremas que podrían ocurrir dentro de un período de 50 años? ¿Cuán turbulento es el viento en el sitio?

La zona elegida se encuentra en la provincia de Segovia, España. En la localidad de **Santo Tomé del Puerto. Una zona elevada situada en el Sistema Central, próximo al Puerto de Somosierra. Coordenadas: (41.198083°, -3.633728°).**

La velocidad media del viento en ese punto es de 6,49 m/s a 100 metros de altura, es una velocidad aceptable para instalar un aerogenerador y cuyo balance sea rentable económicamente. Esta característica se aprecia fácilmente a través del mapa de colores de viento en la Ilustración 1.

También tenemos una intensidad de viento de aproximadamente 387 W/m<sup>2</sup>. Esto, es la potencia transferida por unidad de área, en donde el área es el plano perpendicular en la dirección de propagación de la energía.

Además, en esta zona no consta la existencia de más aerogeneradores puesto que la localización todavía no está explotada.

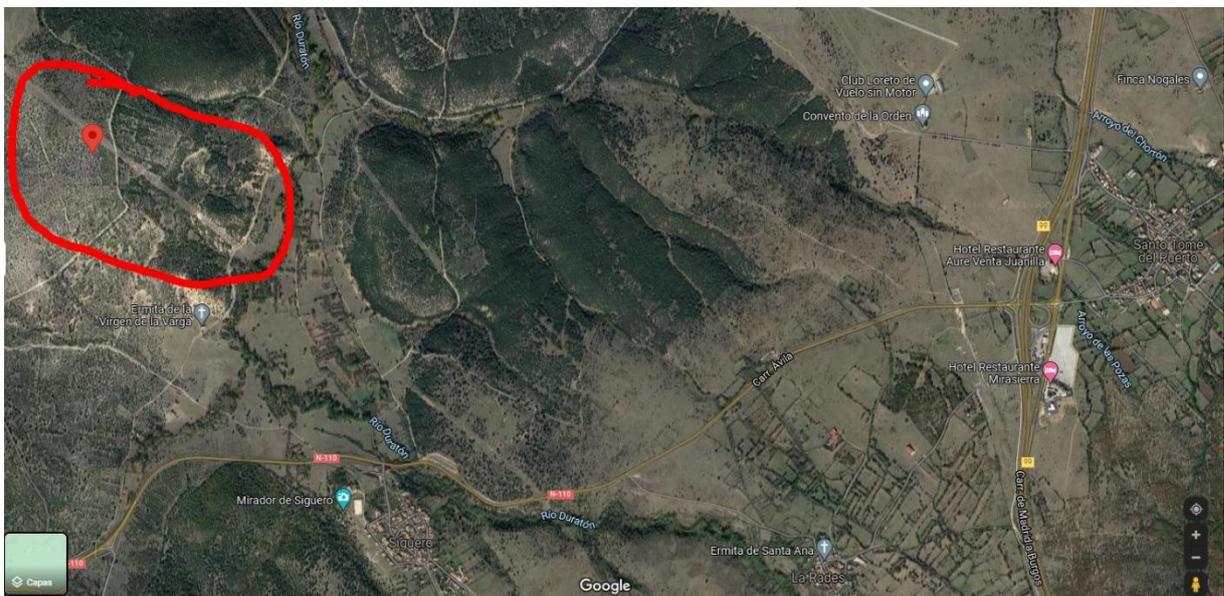
Este entorno, se trata de un páramo elevado en la ladera de la montaña, es una zona llana, en la que no constan bosques ni grandes árboles y en la que existen praderas y ganado. Está muy próxima a la autovía A-1 (Madrid-Burgos), se accede a las coordenadas exactas a través de la carretera N-110 (Carretera de Ávila). Por lo que el acceso para el montaje de las partes del aerogenerador y su mantenimiento es bastante sencillo. Todas estas características geográficas se aprecian en la ilustración 2.

### **CLIMA DE ESTE EMPLAZAMIENTO:**

Al tratarse de una zona montañosa, con poca vegetación, praderas y roca. Tendremos un clima bastante seco sobre todo en verano, por el contrario, en otoño- invierno, los periodos de lluvia hacen que esta época sea especialmente húmeda. Las temperaturas en verano son suaves y en invierno muy bajas, por lo que es un factor a tener en cuenta sobre todo en invierno con la aparición de hielo y nieve.

En el ambiente no están presentes componentes agresivos o dañinos para las estructuras como pueden ser el salitre o la contaminación atmosférica de otras zonas peninsulares.

En la Ilustración 4 se muestran unos mapas e imágenes de la localización geográfica exacta y mapas de viento a 100 metros sobre el terreno:



*Ilustración 11: Situación geográfica del emplazamiento*

En esta imagen de satélite podemos ver la zona donde se colocará el aerogenerador, como se aprecia, cumple con todas las características antes mencionadas. Próxima a Santo Tomé del Puerto y a las carreteras A-1 y N-110.

Se aprecia que es una zona donde en la actualidad no existen aerogeneradores, despoblada y sin gran vegetación. Todo ello facilita el acceso de maquinaria, funcionamiento de la instalación y es respetuoso con la normativa.

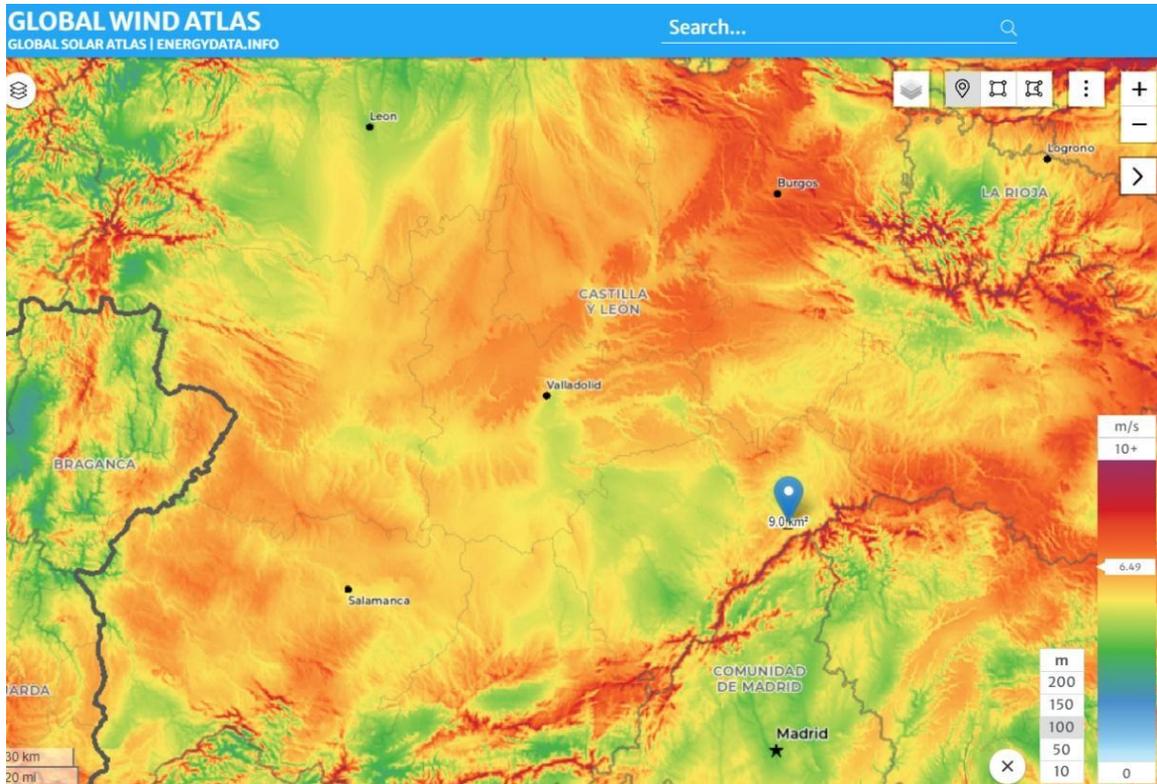


Ilustración 12: Mapa de viento en España

En la ilustración, podemos ver el mapa de viento de España, a través de una leyenda de colores donde nos indica las zonas en las cuales la velocidad media del viento a una altura de 100m es mayor o menor. Siendo mayor la velocidad del viento en colores rojizos y menor en colores verdes y azules. En esta captura en concreto nos hemos centrado en la zona de Castilla y León y Madrid puesto que son las zonas limítrofes con nuestro emplazamiento.

En nuestra localización en Santo Tomé del Puerto, Segovia. Trabajaremos con una velocidad media de unos 6,49 m/s.

La velocidad media será:  **$V=6,49$  m/s**

Este mapa y todos los datos relacionados con el viento se han obtenido a partir de una aplicación o base de datos especificada en la bibliografía.

## 4. AEROGENERADOR ELEGIDO

### 4.1. JUSTIFICACIÓN.

De acuerdo a las características del emplazamiento. Se ha elegido el modelo de turbina AW-3000/116 de ACCIONA. Este modelo tiene capacidad de entregar 3000 kW.

[https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_1003\\_acciona\\_aw-3000-132.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_1003_acciona_aw-3000-132.php).

En la ficha técnica especifica los requerimientos de viento, condiciones ambientales y óptimas para los modelos de la serie AW3000, por ello se ha elegido el modelo 116.

Entre las principales características para la elección influye que, en nuestro emplazamiento tendremos viento moderado-alto unos 6,49 m/s, este modelo de turbina arrancarí a los 3,5 m/s.

Este modelo, soporta turbulencias. Se deben tener en cuenta porque, aunque nos situamos en un terreno con vegetación de matorral y arbusto, estamos cercanos a un puerto de montaña y el viento puede no ser constante y con turbulencias.

Por último, el rango de temperaturas y humedad no supone problema porque está preparado para un intervalo entre -40°C y +40°C.



*Ilustración 13: Detalle de rotor y góndola de Acciona.*

## 4.2. FICHA TÉCNICA

### Datos generales

- Fabricante: Acciona
- Turbina eólica: AW-3000/116
- Potencia: 3 000 kW
- Diámetro: 116 m
- Modelo antiguo
- Clase de viento: IEC IIa
- Compatible offshore: no
- Área de barrido: 10 569 m<sup>2</sup>
- Densidad de potencia: 3.53 m<sup>2</sup>/kW
- Número de palas: 3
- Limitación de potencia: Pitch
- Puesta en servicio: 2012

### Masas

- Masa de la góndola: 106 toneladas
- Masa de la torre: 1100 toneladas
- Masa una pala 52,5 toneladas

### Rotor

- Velocidad máxima del rotor: 12,3 vuelta/min
- Vitesse mínima de viento: 3 m/s
- Vitesse nominal de viento: 10,6 m/s
- Vitesse máxima de viento: 20 m/s

### Caja de cambios

- Caja de cambios: Si
- Niveles: 3
- Ratio 89

### Generador

- Tipo: DFIG
- Número: 1
- Velocidad de salida máxima del generador: 1320 - 1584 vuelta/min



- Tensión de salida: 12000 V

### **Torre**

- Altura mínima de la góndola: 92 m
- Altura máxima de la góndola: 120 m
- Fabricante: Acciona Windpower

### 4.3. GÓNDOLA

La góndola es el elemento principal del aerogenerador. Es la estructura donde van situados todos los elementos mecánicos y eléctricos. Es el chasis del aerogenerador situado en la parte más alta de la torre. Incluye todos los elementos necesarios para convertir el giro del rotor en corriente eléctrica.

El rotor del aerogenerador está formado por las palas (1), el buje (2) y el mecanismo de control de cambio de paso de las palas (3).

Posteriormente, tenemos la transmisión (4), la caja de cambios (5) y el sistema de frenado (6). En la parte central se encuentran acopladores del generador (7) y un sistema de refrigeración basado en un intercambiador de calor (8), luego pasamos al generador (10). Finalmente existen aparatos de medida de viento y condiciones atmosféricas (9). En la ilustración quedan indicados también los anclajes o pernos (13) y la torre (14).

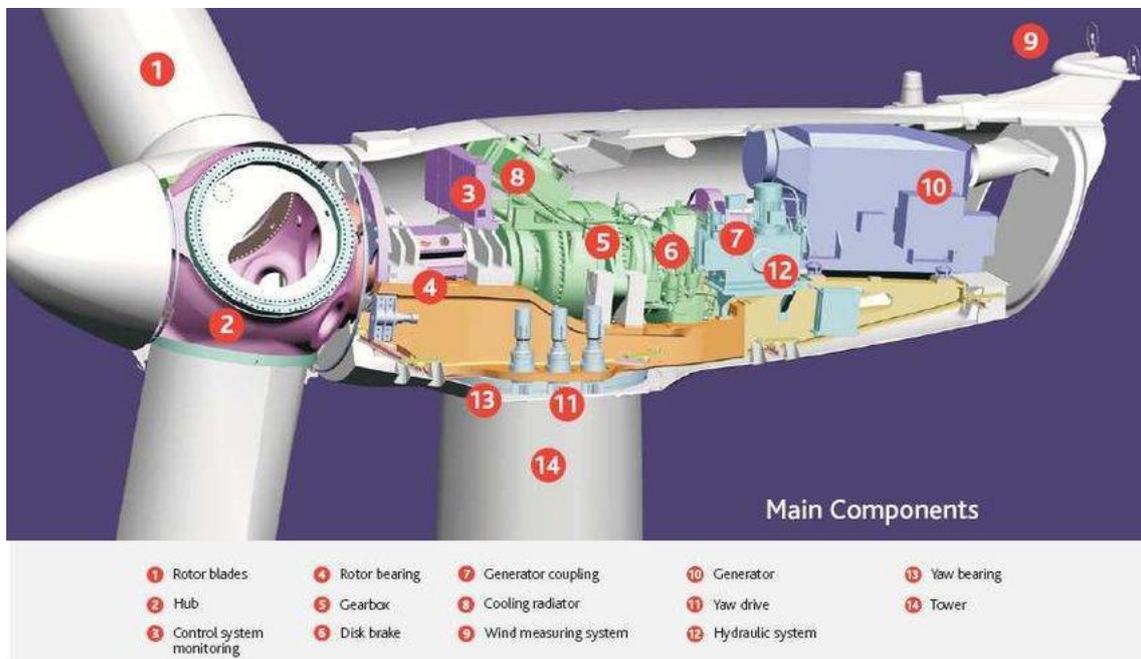


Ilustración 14: Esquema de góndola

#### 4.4. DIMENSIONES Y DATOS ESPECIFICADOS

En este apartado, quedan especificados los datos y medidas del aerogenerador con los que vamos a trabajar:

- Potencia (P): 3000 kW.
- Altura Torre (H): 100 m
- Masa Torre (Mt): 106 t
- Masa Góndola (Mg): 1100 t
- Masa pala (Mp): 60 t
- Area de barrido (A): 10569 m<sup>2</sup>
- Longitud pala (L): 58 m
- Diámetro torre exterior (D): A determinar
- Espesor torre (e): A determinar.

#### 4.5. ELEMENTO PRINCIPAL DE ESTUDIO: TORRE

En un principio se considera la torre como elemento principal de estudio. Es la parte que soporta todas las piezas del aerogenerador y hacia la que se desvían todas las fuerzas que actúan en el aerogenerador.

Tiene un diseño tubular hueco de sección circular, con un cierto grosor. La altura total de la misma será de 100 m. El diámetro, grosor y tipo de acero quedan a determinar en este trabajo.

Adicionalmente ese acero llevará un recubrimiento catódico para evitar la oxidación.

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en módulos de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ".

#### 4.6. MONTAJE DE LOS MÓDULOS DE LA TORRE

Se montan las secciones de la torre mediante pernos y bridas:

Las secciones de la torre de un aerogenerador son atornilladas utilizando bridas de acero laminado en caliente, soldadas a los extremos de cada sección de la torre.

Las bridas están fabricadas de acero recocido y enfriado lentamente. La fotografía muestra un par de bridas.



*Ilustración 15: Detalle de bridas entre módulos del tronco de torre.*

En la siguiente foto vemos como están unidas entre sí las diferentes secciones en el interior de la torre.

La calidad de las bridas y la tensión en los pernos son parámetros importantes para la seguridad de las torres de aerogeneradores.

Para este tipo de montajes se utilizan una grúa telescópica para encajar los módulos de la torre.



*Ilustración 16: Detalle de anclajes y pernos de los módulos de la torre.*

## 5. ESTADO DE CARGAS

En este apartado se van a definir todas las cargas que la estructura del aerogenerador va a tener que soportar. Se va a realizar alguna simplificación del problema centrándose en las cargas y fuerzas que afectan únicamente al poste. Las cargas generadas en las palas y góndola se simplificarán teniendo en cuenta su equivalente en la cota más alta de la torre.

De esta manera se van a tener en cuenta cargas **aerodinámicas** como la fuerza de resistencia aerodinámica distribuida variable con la altura a lo largo de la torre y la fuerza de **empuje** sobre el conjunto palas-góndola. También todos los **pesos** que intervienen.

Para definir las cargas que intervienen, es necesario definir el viento que vamos a utilizar, su perfil de viento en función de la altura, velocidad media de trabajo, velocidad de ráfaga máxima o turbulencia.

### 5.1. MODELO DE VIENTO

Para este estudio se debe modelizar el viento, para ello se va a recurrir a un modelo de perfil de viento medio normal.

Para ello se recurrirá a la norma IEC 1400-1 que es la que regula los aerogeneradores y condiciones eólicas.

#### 5.1.1. TIPOS DE VIENTO

Primeramente, para clasificar el viento que vamos a soportar, se establecen tres parámetros característicos del viento para asegurar un rendimiento y fiabilidad óptimos del aerogenerador. Estos parámetros son: **la velocidad media anual**, las **ráfagas extremas** que podrían ocurrir dentro de un período de 50 años y cómo **de turbulento** es el viento en ese sitio. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission) establece estándares internacionales para las velocidades del viento que cada clase de viento debe resistir. Las distintas clases de viento quedan resumidas en la tabla 1:



	Viento Clase I	Viento Clase II	Viento Clase III	Viento Clase IV
<b>Parámetro</b>				
Velocidad de Referencia ( $V_{ref}$ , m/s)	50	42,5	37,5	30
Velocidad anual promedio ( $V_{avg}$ , m/s)	10	8,5	7,5	6
Turbulencia A. Intensidad turbulencia a 15m/s	0,18	0,18	0,18	0,18
$a^{(1)}$	2	2	2	2
Turbulencia B. Intensidad turbulencia a 15m/s	0,26	0,26	0,26	0,26
$a^{(1)}$	3	3	3	3
Velocidad de ráfaga de 50 años ( $V_{50y}$ ) <sup>(2)</sup>	70	59,5	52,5	42
Velocidad de ráfaga de 1 año ( $V_{1y}$ ) <sup>(3)</sup>	52,5	44,6	39,4	31,5

Tabla 1: Clasificación de tipo de viento según IEC, International Electrotechnical Commission

Como se aprecia en la tabla, el viento más fuerte está dentro de la Clase 1. En nuestro caso la clase que nos corresponde en nuestra localización estaría dentro de la Clase 3 con una velocidad media anual de 6,49 m/s. Esta Clase admite velocidades de hasta los 7,5 m/s y la velocidad de referencia de nuestra turbina será  **$V_{ref} = 37,5$  m/s.**

## TURBULENCIA

Turbulencia del viento. La turbulencia del viento está representada por la energía transportada por los remolinos que se generan en el movimiento del viento en condiciones irregulares.

En energía eólica, la turbulencia se evalúa por la intensidad de la turbulencia, calculada dividiendo la desviación estándar de las series de velocidad del viento de 10 minutos (según normativa GL ha de ser, al menos, de 10 minutos) por su velocidad de viento promedio.

Por ello la intensidad de turbulencia es equivalente a un promedio de la turbulencia de ese lugar.

$$I = \frac{s}{V_{avg}}$$

Donde:

- **s**: Desviación estándar de la velocidad longitudinal del aire a la altura del buje m/s
- **Vavg**: Velocidad media del aire en 10 min (según GL) [m/s]
- **I**: Intensidad de turbulencia

### 5.1.2. PERFIL VIENTO MEDIO

En la capa atmosférica superficial, se conoce que la velocidad del viento tiende a incrementarse a medida que se asciende y que la superficie terrestre ejerce una acción de fricción o de retardo sobre la velocidad del viento más o menos acusada según cómo sea el terreno y que elementos están en él. También influyen en este perfil las condiciones climatológicas y ambientales de calor, presión, humedad, temperatura...

Para representar esto, se suelen utilizar fórmulas matemáticas, unas empíricas, como los modelos exponencial y logarítmico del viento y otras, con fundamentos teóricos.

En los perfiles del viento, lógicamente, las superficies más irregulares o rugosas, tendrán mayor influencia sobre la velocidad del viento que las superficies más lisas, como las aguas estancadas o la superficie de un aeropuerto.

Las figuras siguientes, representan perfiles típicos del viento por los modelos exponencial y logarítmico hasta la altura de 100 metros en una localización concreta, a modo de ejemplo.

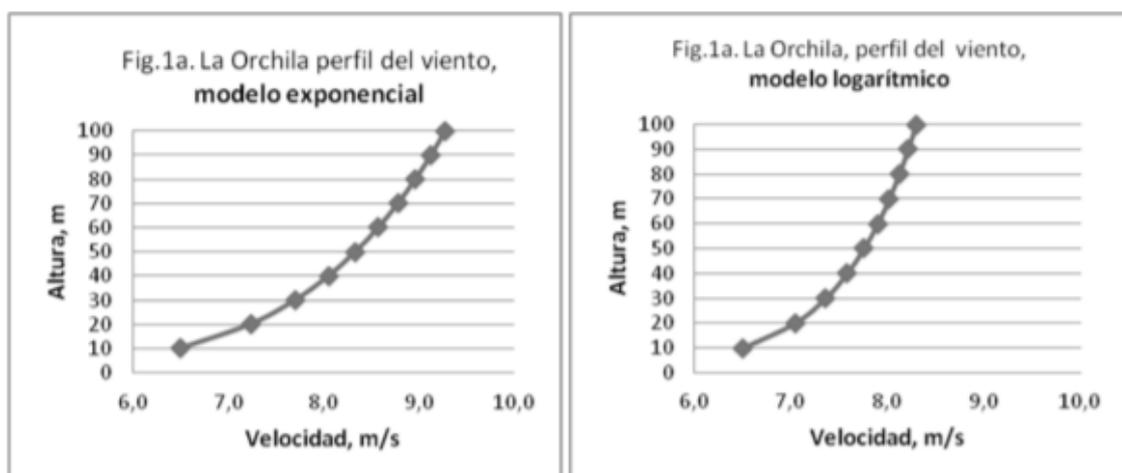


Ilustración 17: Gráficas de perfil de velocidad de viento, exponencial y logarítmico.



A través del anterior ejemplo, vemos quizá que, entre los dos modelos, el modelo exponencial representa mayor variabilidad de la velocidad de viento para la misma altura. Se va a elegir el **MODELO EXPONENCIAL** en este caso de estudio.

### **PERFIL DE VELOCIDAD DE VIENTO NORMAL (NWP):**

Existen diferentes fórmulas o modelos de mayor utilización para representar el perfil vertical del viento, esencialmente útiles para la condición de equilibrio atmosférico neutro. Para este concepto y lo relacionado con las otras clases de equilibrio atmosférico, véase Guevara (2008).

La fórmula por utilizar consiste en:

$$\frac{V_z}{V_{avg}} = \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad \blacktriangleleft \quad V_z = V_{avg} * \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha$$

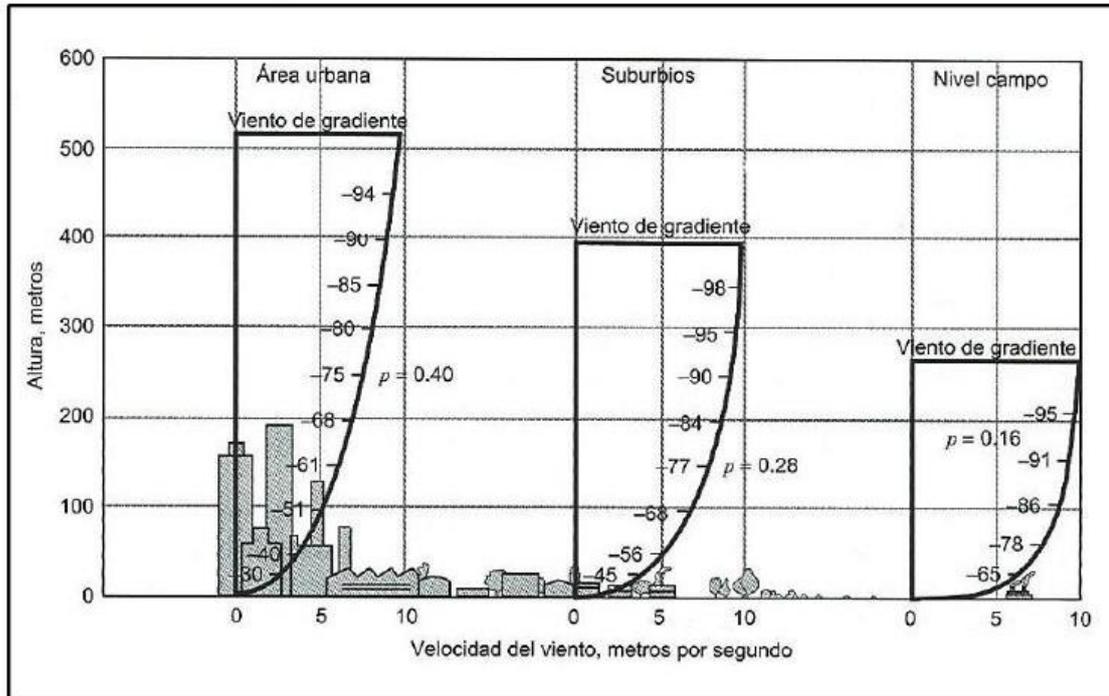
Donde:

- **V<sub>z</sub>**: Velocidad del viento a estimar a una altura z sobre el nivel del suelo.
- **V<sub>ref</sub>**: Velocidad de referencia, velocidad media del viento observada a una altura preestablecida viento clase III, V<sub>ref</sub> = 37,5 m/s.
- **Z<sub>ref</sub>**: denominada altura de referencia, z.
- **α**: Exponente de rugosidad.

#### Valores típicos del exponente de rugosidad del terreno:

Varía entre 0,0 a 0,40, según el tipo de rugosidad del terreno:  
Agua, 0,13; grama, 0,14 a 0,16; cultivos y arbustos, 0,20; bosques, 0,25 y zonas urbanas, 0,40. Wagner et al. (2008).

**En este caso de estudio se considerará α=0,2.**



Fuente: Wark y Davis (1998).

Ilustración 18: Gradiente de viento en función de la rugosidad del terreno.

En la ilustración 18, se aprecia claramente el efecto que tiene el coeficiente de rugosidad sobre el perfil de velocidades y su gradiente en los diferentes tipos de terreno. La velocidad máxima se alcanza antes, a menor altura, cuando apenas hay elementos obstáculos. Se aprecia que cuanto más rugoso sea el terreno (con más obstáculos), la velocidad máxima se alcanza a mayor altura.

Para aplicar esta fórmula se debe conocer una velocidad de referencia  $V_{ref}$ , a una cierta altura,  $Z_{ref}$ , observada al menos durante un año para obtener una velocidad media de la velocidad del viento en esa zona.

Se irán dando valores de  $Z$  para conocer a cada altura su velocidad correspondiente.

**Perfil de velocidad en el caso de estudio (para rugosidad 0,2 Y altura de 100m):**

$$V_z = 37,5 * \left(\frac{Z}{100}\right)^{0,2}$$

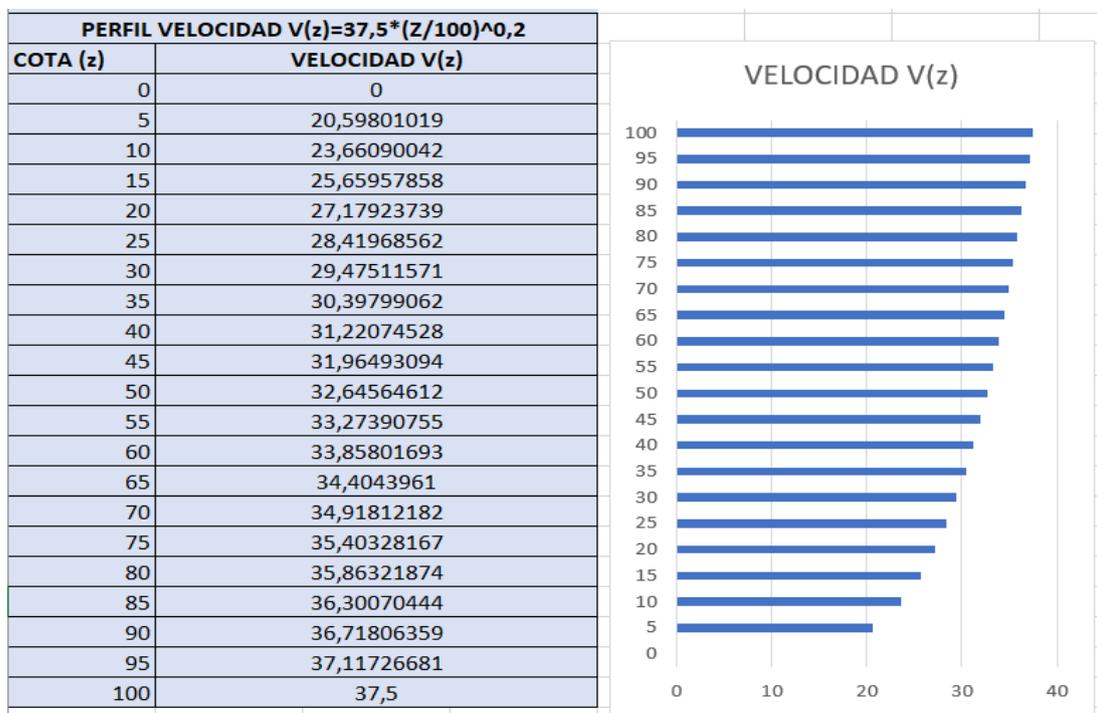


Ilustración 19: Perfil de velocidad para el viento de estudio, en función de la cota.



Con este perfil de velocidades tenemos la distribución de velocidad en función de la altura.  $V(z)$ . Podemos determinar la altura más conveniente para colocar la turbina, teniendo en cuenta el coste y la eficiencia que obtendremos.

### **MODELO NORMAL DE TURBULENCIA (NTM):**

$$s = \frac{I + a * v_{hub}}{a + 1}$$

Donde:

- **I**: Intensidad de turbulencia del viento a una velocidad de 15 [m/s], viene determinado por la clase de viento. Este valor viene en la TABLA 1. (0.18)

- **V<sub>hub</sub>**: Media de 10 minutos de la velocidad del viento a la altura del buje [m/s]

- **a**: Flujo Axial de Inducción del aerogenerador. ( $a = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$ ). Siendo  $U_1$  la velocidad del viento en un punto alejado del aerogenerador y  $U_2$  la velocidad del viento en el rotor.

### 5.1.3. CONDICIONES VIENTO EXTREMO

#### **MODELO DE VELOCIDAD EXTREMA (EWM)**

Según la Norma de referencia IEC 1400-1 las velocidades del viento, promediadas cada 3 segundos, extremas anuales, que tienen períodos de retorno de 50 años y 1 año, se calculan como:

$$V_{e50} = 1,4 * V = 1,4 * V_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha$$

$$V_{e1} = 0,8 * V_{e50}$$

Sustituyendo la velocidad de referencia como 37,5 m/s y la altura de referencia de 100m:



$$V_{e50} = 1,4 * V = 1,4 * 37,5 \left( \frac{Z}{100} \right)^{0,2}$$

Finalmente se utilizará el perfil de velocidades con periodos de retorno en 50 años, establecido por la IEC. Abarca velocidades más elevadas que el modelo para un año

## 5.2. CARGAS ESTÁTICAS

Principalmente cargas debidas a los pesos de los elementos. Son cargas que actúan en el eje vertical debidas a la acción de la gravedad.

También cuando existan se deben considerar otro tipo de cargas como la nieve, aunque estas también deben tipificarse como peso.

### 5.2.1 PESO SUBCONJUNTO GÓNDOLA/PALAS

Este peso constará del peso de cada pala por tres unidades, especificado en la ficha técnica de este modelo de aerogenerador. El peso de la góndola con todos los elementos que hay en su interior también vienen especificados en la ficha técnica. Son pesos constantes a efectos de todos los cálculos de este trabajo.

### 5.2.2 PESO TORRE

Se considerará el peso de toda la torre porque se va a estudiar el punto de más solicitudes en la base. Ese punto soporta el peso máximo de todo el material de torre.

El peso del material de la torre se calculará mediante la siguiente expresión:

$$P = \rho_{acero} \pi L \left( \frac{D^2}{4} - \left( \frac{D}{2} - e \right)^2 \right)$$

De esta manera tenemos el peso total en función del diámetro que se elija.

### 5.3. CARGAS AERODINÁMICAS

Cargas debidas a la interacción entre el sólido, nuestro poste de aerogenerador, con el fluido. En este caso, el viento.

#### 5.3.1. FUERZA DE EMPUJE SOBRE CONJUNTO PALAS-TURBINA.

Un aerogenerador es una máquina que obtiene energía cinética de un flujo de viento. Esto se consigue transformando parte de la energía cinética de ese flujo en energía mecánica en la turbina. Para ello es necesario hacer pasar ese flujo de viento a través de las palas, formando así un tubo de corriente de sección circular.

Es importante destacar que el aerogenerador se va a comportar como una máquina hidráulica porque el fluido no va a variar su densidad.

Aguas arriba del rotor, tenemos el viento que lleva su velocidad máxima en el perfil de velocidades de la torre. A medida que el viento se acerca al rotor, según el principio de Bernoulli sabemos que la velocidad va disminuyendo hasta la velocidad ( $V_D$ ) en el plano del rotor. Aguas abajo del rotor, se obtiene un valor mínimo de la velocidad y para mantener el mismo caudal que aguas arriba, la sección circular del tubo aumenta.

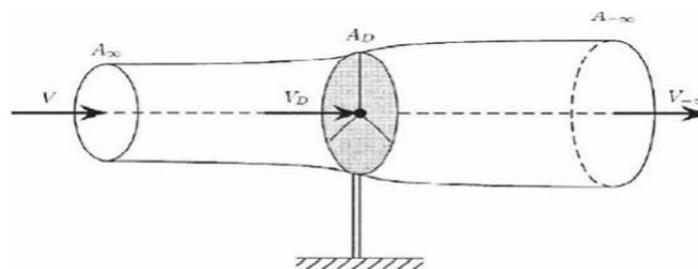


Ilustración 20: Tubo de corriente de viento.

En este trabajo para realizar el cálculo de la fuerza de arrastre horizontal, se escoge el valor de la velocidad del viento a una cota de 100m que hemos obtenido de la clasificación de este viento elegido.

Si hubiere que calcular la velocidad del viento en el centro del rotor deberíamos realizar el cálculo mediante las ecuaciones clásicas de mecánica de fluidos.

Datos:

- $v = 37,5$  m/s. (velocidad a 100m)
- $A = 10568,32$  m<sup>2</sup> (longitud pala = 58m).
- Densidad aire  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup>.

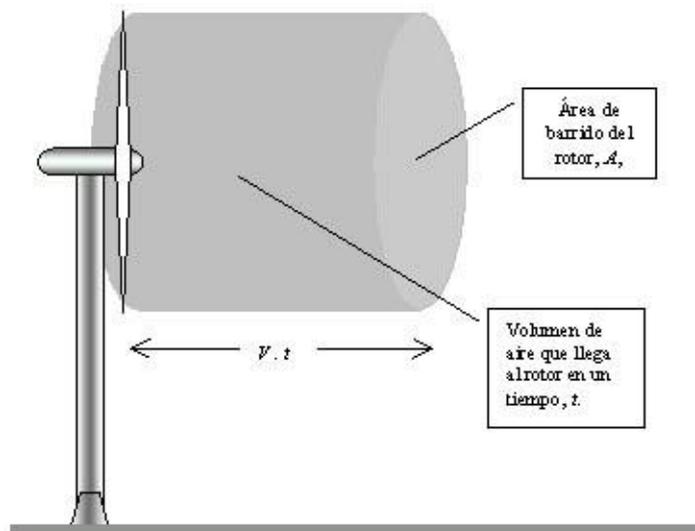


Ilustración 21: Geometría del tubo de corriente

- POTENCIA EÓLICA

La energía del viento (cinética) al pasar por el área de barrido de las aspas, se transforma en potencia teniendo en cuenta el coeficiente de potencia (Limite de Betz) porque no todo es potencia útil.

Tenemos la energía cinética del viento donde  $m$  es la masa de aire y la  $v$  es la velocidad del viento.

$$E_c = E_m = \frac{1}{2}mv^2$$

La potencia contenida en el aire que atraviesa el área de barrido del aerogenerador se obtiene derivando la energía:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2$$

Esta potencia está definida respecto a una masa de aire que la podemos expresar como el  $V$  y su densidad a través de un tubo de corriente o cilindro:

$$m = V\rho$$

A su vez el volumen de aire y por ello su masa varía al atravesar el aerogenerador:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt}; \quad Q = \frac{dV}{dt} = Av$$

Obtenemos:

$$P = \frac{1}{2} = \rho Av^3$$

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho v^2 * Av = \frac{1}{2} \rho v^3 A$$

$$P_{viento} = \frac{1}{2} 1,225 * (37,5)^3 * 58^2 \pi = 341354,59kW$$

## COEFICIENTE DE POTENCIA

Una **turbina** eólica de este tipo puede convertir en energía mecánica como máximo un 59,26 % de la energía cinética del viento que incide sobre ella. El coeficiente de potencia determina qué cantidad de energía se puede transformar. El límite de Betz es el máximo coeficiente de potencia que puede dar una máquina eólica de cualquier tipo.

*Hipótesis de Betz:*

- Las palas giran sin fricción
- Volumen de control fijo
- La presión estática aguas abajo y arriba del rotor coincide con la presión externa a la corriente de aire.
- Fuerza desarrollada por unidad de área equivalente ( fuerza de empuje) sobre el centro del rotor es cte.
- Fluido ideal e incompresible.
- Perturbación del fluido entre palas es cero

## LÍMITE DE BETZ:

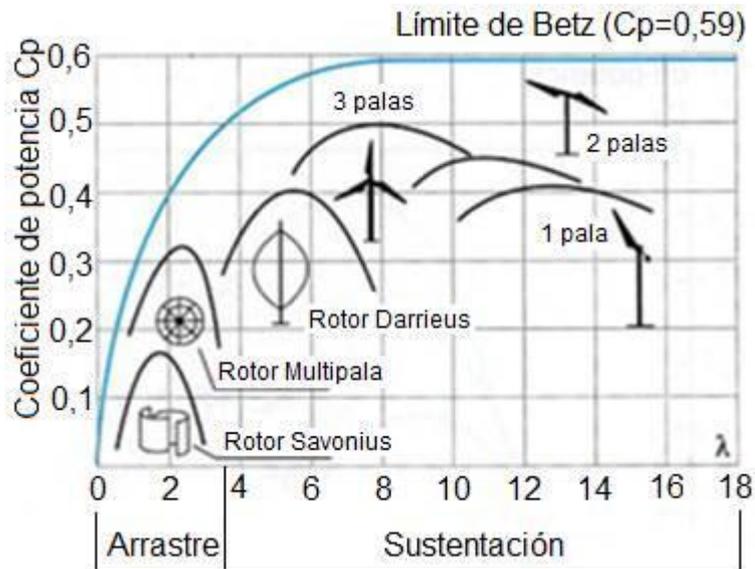


Ilustración 22: Coeficiente de potencia límite de Betz para cada rotor.

$$P_{util} = C_p P_{viento} = 59,3\% P_{viento} = 202423,276kW$$

- FUERZA ARRASTRE AERODINÁMICA ROTOR (FDrotor)

Habiendo calculado la potencia del viento en bruto en el área de barrido, calculamos la fuerza de arrastre.

La fuerza de arrastre aerodinámica que produce el aire al pasar por la zona de barrido reducida al eje del rotor es:

$$P_{viento} = Fv$$

$$F_{Drotor} = \frac{1}{2} \rho v^2 * A = 999,76029kN$$

### 5.3.2. FUERZA DE RESISTENCIA AERODINÁMICA SOBRE LA TORRE.

Se denomina fuerza de resistencia aerodinámica a la fuerza que ejerce el viento sobre toda la torre.

Es una carga variable con la altura

Viene representada por la componente de esa fuerza en la dirección de la velocidad. En este caso se tomará la componente horizontal de velocidad para cada altura z.

*Hipótesis: Resistencia aerodinámica debida sólo a fuerza de presión.*

Esta fuerza puede ser debida a la presión del viento sobre el poste o a la fricción del viento sobre la superficie del poste.

Hay que tener en cuenta el poste de estudio, como un cuerpo romo. Por ello seguiremos la teoría de aerodinámica de cuerpos romos y únicamente se va a tener en cuenta la resistencia aerodinámica por **fuerza de presión**. Por tanto, consideramos que no hay apenas desprendimiento de la capa límite. Entonces podemos despreciar las fuerzas de fricción frente a las de presión.

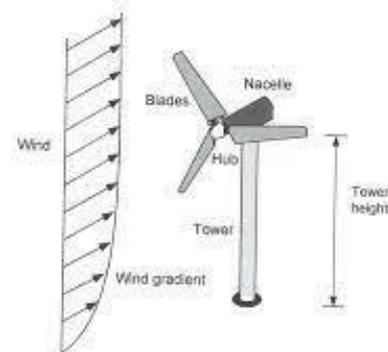


Ilustración 23: Perfil de viento incidente en el aerogenerador.

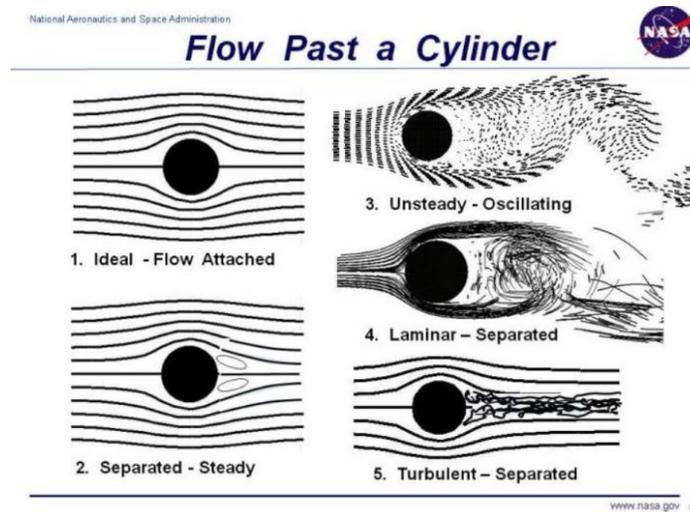


Ilustración 24: Desprendimiento de capa límite de un fluido laminar al enfrentarse a un cilindro liso.

En la ilustración anterior vemos los diferentes casos en función si tenemos un flujo ideal, sin desprendimiento de capa límite, o si tuviéramos desprendimiento de capa límite y apareciese un flujo turbulento. En nuestro caso hemos dicho que no va a haber fuerzas de fricción por lo tanto estaríamos en el caso más cercano a la idealidad, solo gobernado por efecto de la presión sobre el poste en función de la altura a la que nos encontremos y demás factores que se van a estudiar.

## **EXPRESIÓN RESISTENCIA AERODINÁMICA:**

Se considera al viento como un fluido que se desplaza con una densidad, en función de su presión y temperatura. Que se desplaza a una velocidad variable en función de la altura H, de 100 metros.

La torre ofrecerá una resistencia aerodinámica a ese fluido, que, por la segunda ley de Newton, será igual a la fuerza ejercida por el viento sobre la torre.

A continuación, se muestra la ecuación genérica, posteriormente se integrará para toda la altura de la torre con el perfil de velocidades elegido:

$$Fd = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 A \quad A = L * D$$

En la expresión de la resistencia aerodinámica, intervienen la densidad del fluido, su velocidad variable con la altura y representada por el perfil de velocidad, el área transversal de la sección y el coeficiente Cd.

### Coeficiente de resistencia aerodinámica Cd:

En Mecánica de Fluidos, el coeficiente de resistencia, Cd, es un número adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire o el agua. Es utilizado en la ecuación de resistencia aerodinámica, en donde un coeficiente de resistencia bajo indica que el objeto tendrá menos resistencia aerodinámica.

Este coeficiente está íntimamente relacionado con el número de Reynolds (Re) y el diámetro de la torre, que es nuestra incógnita de diseño.

### Número de Reynolds:

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, relacionado con los fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido con una velocidad. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. Depende de la densidad, viscosidad, dimensión característica y sobre todo de la velocidad del fluido.

Para calcular el  $Re$ , se toman las siguientes consideraciones:

- Como saldrá un Reynolds muy alto, significa que el viento estará en flujo turbulento, por lo tanto, se obtendrá la velocidad del modelo para ráfaga extrema turbulenta en el punto más alto  $Z = 100\text{m}$ .
- El diámetro como es nuestra incógnita se utilizará uno genérico aproximado de  $5\text{ m}$  para poder entrar en la tabla. Una vez obtenido el real se verá que hay poca variación de  $C_d$ .

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,225 * 1,4 * 37,5 \left(\frac{100}{100}\right)^{0,2} * 5}{10^{-5}} = 3,2156 * 10^7$$

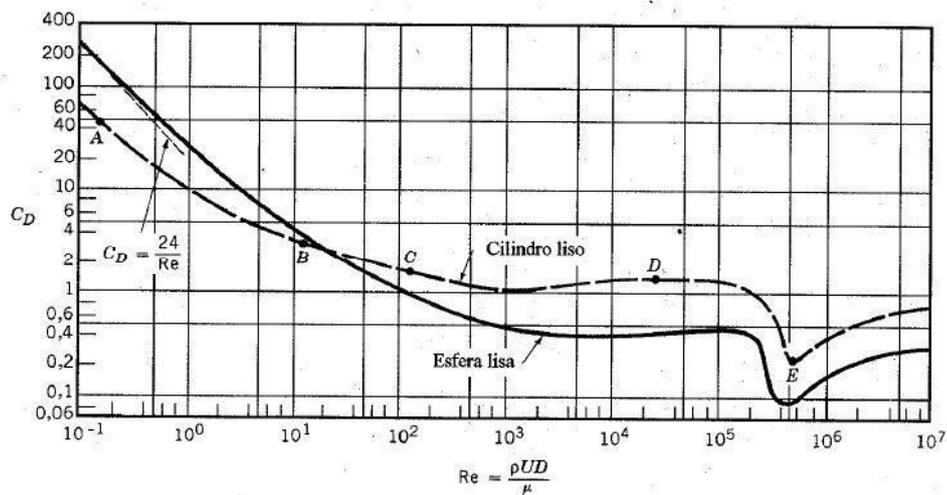


Ilustración 25: Gráfica obtención coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.

Efectivamente el orden de magnitud del Reynolds es elevado a 7, por ello, es indiferente el valor del diámetro que se elija, no va a influir de manera significativa en el valor del resultado siendo un valor elevado a la 7.

Por lo tanto, si entramos en la tabla anterior con el Reynolds, obtenemos un  **$C_d$  aproximado de 0,72**.

En nuestro caso, sustituyendo en la expresión de la resistencia aerodinámica y teniendo en cuenta que la velocidad sigue un perfil variable con la altura  $z$ :

$$F_D(z) = \frac{1}{2} \rho C_D v(z)^2 L D$$

Tomando elementos diferenciales de altura o longitud:

$$dF_D(z) = \frac{1}{2} \rho C_D v(z)^2 L D dz$$

Sustituyendo el perfil de velocidad:

$$dF_D(z) = \frac{1}{2} \rho C_D \left( 1,4 * V_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \right)^2 L D dz$$

Integrando para toda la altura del poste, **obtenemos la expresión de la fuerza de resistencia aerodinámica para la altura de 100 m:**

$$F_D(z) = \frac{1}{2} \rho C_D \int_0^H \left( 1,4 * V_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \right)^2 D dz$$

$$F_D(z) = \frac{1}{2} 1,225 * 0,72 \int_0^H \left( 1,4 * 37,5 \left( \frac{Z}{100} \right)^{0,2} \right)^2 D dz$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad aire 1,225 (kg/m<sup>3</sup>)
- Cd: Coeficiente de arrastre, 0,72.
- Vref: velocidad aire a una altura de 100m. 37,5 m/s.
- Zref: Altura de referencia de 100m.
- $\alpha$ : Exponente de rugosidad, 0,2.
- D: Diámetro en metros.



**Fuerza de resistencia aerodinámica a una altura de 100m:**

$$F_D(z = 100) = 86821,87D \text{ (N)} = 86,82187D \text{ (kN)}$$

## 6. ESTUDIO ANÁLITICO SIMPLIFICADO DE ESFUERZOS EN LA TORRE.

En este apartado se va a estudiar de forma analítica el impacto que tienen sobre la misma, todas las fuerzas antes descritas. De esta forma podremos comprobar si los resultados satisfacen con garantías las normativas vigentes de seguridad.

Se estudiará la geometría y material de la torre para soportar los esfuerzos y deformaciones de la estructura. Queda a determinar el diámetro de la torre y el tipo de acero utilizado puesto que, desde un punto de vista de ingeniería depende de varios factores que se estudiarán a continuación.

Para llevar a cabo esto, se ha propuesto un estudio numérico de acuerdo con criterios de seguridad vistos en resistencia de materiales.

### 6.2. ESTADO DE CARGAS EN EL MODELO

Se va a estudiar la torre asemejándose a una viga en voladizo (empotrada por uno de sus extremos en posición vertical, el otro extremo permanece libre).

Esta viga se someterá al estado de cargas anteriormente descrito, con cargas provenientes del viento y del conjunto góndola/palas.

#### **Fuerzas horizontales:**

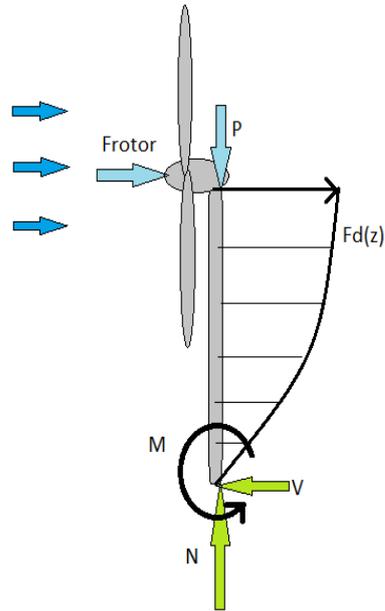
Se tendrá una fuerza de arrastre o resistencia aerodinámica, distribuida a lo largo de la torre y una fuerza de empuje en la parte superior de la torre, que es la equivalente reducida del subconjunto palas/góndola a la torre.

#### **Fuerzas verticales:**

Se tendrá en cuenta un esfuerzo axial equivalente a los pesos de los elementos del aerogenerador.

Como se ha estudiado durante la carrera, el tratarse de un empotramiento, en esa sección quedan restringidos tres grados de libertad, por ello existen tres reacciones: Esfuerzo cortante (V), Esfuerzo Axial (N) y un Momento Flector (M).

En este tipo de disposiciones, el empotramiento es la sección con mayores sollicitaciones mecánicas por ello será la sección crítica del estudio.



*Ilustración 26: Estado de cargas en el aerogenerador en estudio.*

En la imagen anterior tenemos representado el estado de fuerzas exteriores que actúan sobre la estructura del aerogenerador. También están representadas las reacciones debidas a las fuerzas exteriores en la sección más crítica de la estructura, el empotramiento.

A continuación, se estudiarán los momentos y esfuerzos que se deben soportar en la sección crítica:

- MOMENTO FLECTOR (M)

La acción del viento va a producir una fuerza de arrastre por presión variable a lo largo de la altura de la torre, esta fuerza distribuida va a producir un momento distinto en cada cota. Como el momento es fuerza por distancia se va a realizar la integral de ese producto a lo largo de toda la altura de la torre.

También influye la fuerza de arrastre sobre el conjunto palas-góndola en lo alto del aerogenerador. Esta fuerza con una equivalente situada en la cota de 100 metros.

De esta manera, el momento flector para cada cota de estudio viene dado por:

$$dM = dF_D * z$$

$$M(z) = \int_0^H dF_D * z dz$$

Donde:

- M: Momento Flector
- Fd: Fuerza arrastre por presión
- z: Altura de estudio en cada punto.
- Zref = 100 metros.
- H = 100 m Altura total de la torre.
- Cd = 0,72 Coeficiente arrastre.
- Vref = 37,5 m/s
- ρ = densidad aire 1,225 kg/m3.
- α: Exponente de rugosidad, 0,2.

Sustituyendo el diferencial de Fuerza de arrastre calculada anteriormente y la equivalente del conjunto palas-góndola:

$$M(z) = F_{DROTOR} * Z_{max} + F_{DVIENTO}(z) * z$$

$$M(z) = F_{DROTOR} * Z + \int_0^{H=100m} \frac{1}{2} \rho C_D \left( 1,4 * V_{ref} \left( \frac{z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \right)^2 D * z dz$$

Ahora, podremos hallar el momento para cada punto de la torre, lo realmente interesante es obtener el momento máximo que engloba los esfuerzos en toda la torre.

$$M = 999760,29 * 100 + \int_0^{H=100m} \frac{1}{2} \rho C_D \left( 1,4 * V_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \right)^2 Dz dz (Nm)$$

$$M = 99976029 + 5064609D Nm$$

$$M = 99976,029 + 5064,609D kNm$$

- ESFUERZO AXIL (N)

En nuestro caso el esfuerzo axil será igual a la suma de todos los pesos del conjunto palas-góndola y de la torre. Será igual a la aceleración de la gravedad por la masa de cada elemento, todo ello con signo negativo porque va en sentido contrario al sistema de ejes elegido inicialmente.

Como estamos calculando el axil total en la base de la torre porque es el punto más crítico, debemos tener en cuenta el peso de las 3 palas, el peso de la góndola y el peso del acero de la torre.

Para calcular la masa de la torre, es equivalente a multiplicar la densidad del acero por el volumen de la torre tubular hueca.

$$N = P_{gondola} + 3P_{pala} + \rho_{acero} \pi L \left( \frac{D^2}{4} - \left( \frac{D}{2} - e \right)^2 \right)$$

Donde:

- D: diámetro exterior que debemos calcular.
- e: Espesor igual a 0,2m
- Mgon (masa góndola) = 106000 kg.
- Mpala = 52500 kg.

- $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ . Densidad acero.

$$N = 2582300 + 7850 * \pi * 100 \left( \frac{D^2}{4} - \left( \frac{D}{2} - 0,2 \right)^2 \right)$$

$$N = 2582300 + 2466150 \left( \frac{D^2}{4} - \left( \frac{D}{2} - 0,2 \right)^2 \right) (N)$$

$$N = 2582,300 + 2466,150 \left( \frac{D^2}{4} - \left( \frac{D}{2} - 0,2 \right)^2 \right) (kN)$$

- ESFUERZO CORTANTE (V)

En este caso el esfuerzo cortante que sufre nuestra torre empotrada aparecerá en la sección de empotramiento debido a la reacción del terreno frente a la fuerza de empuje del viento sobre el subconjunto palas-rotor y la fuerza de arrastre distribuida por la torre.

Aplicando teoremas vectoriales y tomando fuerzas en el eje x e igualando a cero, obtenemos la fuerza en el apoyo en dirección x.

$$\sum_0^{100} F_{ext} = 0$$

Aplicándolo en x:

$$F_D + F_{DROTOR} = R_x = V$$

$$V = \int_0^{H=100m} \frac{1}{2} \rho C_D \left( 1,4 V_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \right)^2 D dz + \rho \pi R^2 * (v_1 - v_2)$$

$$V = 86821,875 * D + 999760,29 \text{ (N)}$$

$$V = 86,821875 * D + 999,76029 \text{ (kN)}$$

### PONDERACIÓN DE CARGAS

Según el CTE, en el documento básico de seguridad estructural. En este tipo de estructuras las cargas que va a soportar la estructura deben multiplicarse por su respectivo coeficiente de seguridad. Ese coeficiente varía según las inclemencias a las que esté sometida la estructura y su grado desfavorable.

En este caso y según el CTE, se tendrían acciones constantes (pesos) y combinación de dos acciones variables, las sobrecargas debidas al movimiento de las palas (inercias) y la acción del viento. Esas inercias del movimiento de las palas solo aparecen cuando se arranca o se para el aerogenerador, una vez que trabaja a régimen todas esas inercias están equilibradas.

Las sobrecargas debidas al movimiento de las palas de no se van a considerar porque el estudio se realiza del régimen permanente de uso del aerogenerador. No del transitorio.

#### Combinación de acciones:

Para tener en cuenta acciones variables y estáticas combinadas, la forma general de utilizar los coeficientes de ponderación ( $\gamma$ ) y simultaneidad ( $\Psi$ ):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

En este caso, el primer término (G, P) corresponde a cargas permanentes, los pesos. El segundo término (Q) corresponde a cargas variables, el viento o sobrecargas.

Si estuvieran actuando a la vez mas de una carga variable, también se debe considerar el coeficiente de simultaneidad.

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		<b>desestabilizadora</b>	<b>estabilizadora</b>
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

<sup>(1)</sup> Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Ilustración 27: CTE coeficientes de ponderación

	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		<sup>(1)</sup>	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

<sup>(1)</sup> En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Ilustración 28: CTE coeficientes de ponderación

En este caso, los coeficientes de ponderación según el CTE, considerando estudio a resistencia y en el caso más desfavorable:

- Cargas estáticas (Pesos) :  $\gamma = 1,35$ .
- Cargas variables (Viento):  $\gamma = 1,50$ .

Los coeficientes de simultaneidad en este caso, al estudiar el régimen permanente de uso del aerogenerador, no se van a dar porque solo tenemos como carga variable el viento. Las sobrecargas no se dan.

### **\*\* NIEVE:**

La nieve puede ser una carga frecuente en nuestro aerogenerador porque está localizado en una zona montañosa de gran altura.

La posible carga debida a la nieve en este caso no se va a tener en cuenta porque la superficie que puede ser cubierta por la nieve es muy reducida y su peso despreciable frente al resto de cargas.

### **CARGAS PONDERADAS (x1,35): PESOS**

$$P_{TOTAL} = 1,35 * (P_{GONDOLA} + 3P_{PALA} + P_{TORRE}(z))(kN)$$

### **CARGAS PONDERADAS (x1,50): FUERZAS ARRASTRE**

$$F_{VIENTO}(z) = F_D(z) * 1,50 (kN)$$

$$F_{DROTOR} = 149964,044(kN)$$

### **ESFUERZOS PONDERADOS:**

$$M^* = 149964,044 + 7596,914D \text{ (kNm)}$$

$$N^* = 3486,105 + 3329,303 \left( \frac{D^2}{4} - \left( \frac{D}{2} - 0,2 \right)^2 \right) \text{ (kN)}$$

$$V^* = 130,233 + 1499,64004D \text{ (kN)}$$

“1223 RD 1829/1995 Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 (Estructuras de acero en edificación)”.

## 6.2. ESTUDIO DE RESISTENCIA Y FLECHA MÁXIMA.

### **TENSIONES MÁXIMAS:**

Se sabe que, en una estructura de este tipo, la sección con mayores solicitaciones se encuentra en el empotramiento. Por ello se estudiará en esta sección las tensiones máximas.

Para un primer dimensionamiento una buena aproximación es tener en cuenta sobre todo la tensión debida al momento flector porque suele ser el valor más abultado. Para esa primera aproximación, normalmente el efecto del cortante y axil se desprecia.

Posteriormente para el dimensionado final es necesario tener en cuenta todos los términos:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M \cdot y}{I} \text{ (MPa)}$$

$$\tau_{max} = \frac{k \cdot V}{A}$$

Área de la sección transversal:

$$A = \pi \left( \frac{D^2}{4} - \frac{(D - 2e)^2}{4} \right)$$

Inercia de la sección:

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - (D - 2e)^4)$$

Constante k:

Es el valor por el que hay que multiplicar el esfuerzo cortante medio para obtener el máximo.

Para geometrías circulares ese valor es de 4/3.

### CRITERIO VON MISES DE TENSIÓN EQUIVALENTE:

Según el RD 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) establece que el criterio de Von Mises para estudiar la seguridad estructural del acero es el más adecuado. En este caso calculamos la tensión equivalente de Von Mises y se obtiene el coeficiente de seguridad.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2}$$

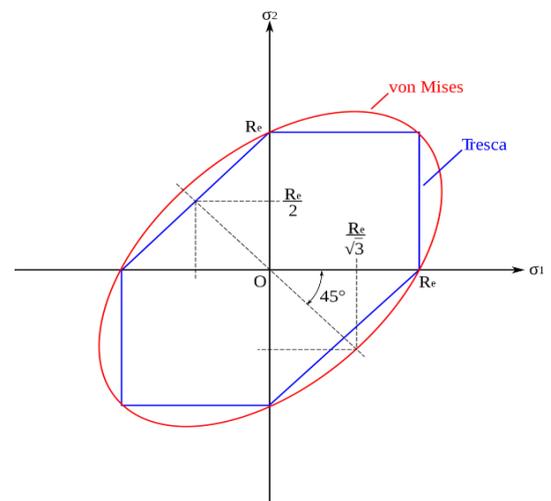


Ilustración 29: Criterio de Tensión equivalente de Von Mises y de Tresca.



En la ilustración anterior se hace una comparativa acerca de la seguridad que proporciona el criterio de Tresca y el de Von Mises. Esta imagen ilustra el área que engloba cada criterio, todos los puntos de tensión que caigan dentro de ese área, se les considera seguros. Para cuantificar la seguridad se tiene el coeficiente de seguridad:

**El coeficiente de seguridad “n”:**

$$n = \frac{\sigma_e}{\sigma_{eq}}$$

Una vez elegido el tipo de acero, tenemos su tensión admisible o límite de resistencia a fluencia, para compararlo con la tensión equivalente. Si el cociente da mayor que 1, estaríamos dentro del área de la elipse de la figura y por tanto en la zona de seguridad.

- **ELS (Estado Límite de Servicio) DEFORMACIONES**

En este caso se estudiará la flecha máxima, el desplazamiento máximo en una sección de la estructura. En el caso de estudio, éste se da en la parte más alta de la torre, en la cota de 100m. En este caso podemos hablar de desplazamiento máximo del punto central de la sección por ser el centro de gravedad del tubo redondo hueco.

Para calcular el desplazamiento horizontal máximo se utilizarán las **cargas características**, cargas sin ponderar.

Según el CTE, el Documento Básico “Seguridad Estructural” del Código Técnico de la Edificación establece:

#### 4.3.3.2 Desplazamientos horizontales

- 1 Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, susceptibles de ser dañados por desplazamientos horizontales, tales como tabiques o fachadas rígidas, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones característica, el desplome (véase figura 4.1) es menor de:
  - a) desplome total: 1/500 de la altura total del edificio;
  - b) desplome local: 1/250 de la altura de la planta, en cualquiera de ellas.
- 2 Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones casi permanente, el desplome relativo (véase figura 4.1) es menor que 1/250.
- 3 En general es suficiente que dichas condiciones se satisfagan en dos direcciones sensiblemente ortogonales en planta.

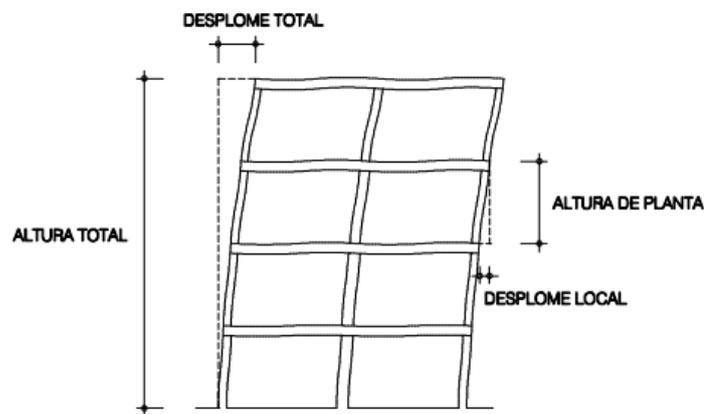


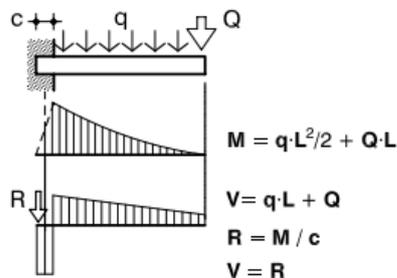
Figura 4.1 Desplomes

Ilustración 37: CTE- DSE- Flecha y desplome máximos.

Para piezas en voladizo:

$$f_{max} \leq \frac{2L}{200}$$

Cálculo flecha máx.:



**MÉNSULA**

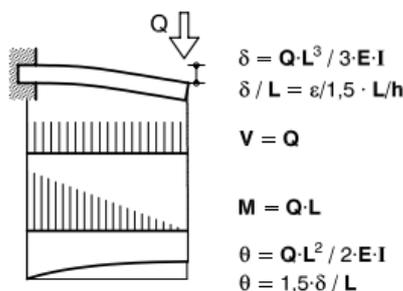
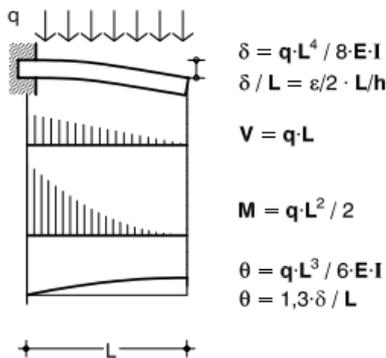


Ilustración 30: Prontuario viga empotrada libre.

Para el cálculo de la flecha máxima se puede acudir a un prontuario de una viga en voladizo o ménsula.

En el caso de la torre del aerogenerador tenemos combinación de carga repartida y carga puntual en la punta.

$$\delta = \frac{F_d L^4}{8EI} + \frac{F_{rotor} L^3}{3EI}$$

También se puede calcular la flecha máxima con procedimientos de cálculo como Principio de los trabajos virtuales (PTV) o Pendiente-Desviación. En nuestro caso la flecha máxima, ósea el máximo desplazamiento en toda la torre se va a calcular mediante métodos numéricos con el programa MD SOLIDS.

- **ELU (Estado Límite Último) TENSION MÁX.**

Según el CTE, en el documento básico de seguridad estructural, se analiza el estado límite último a resistencia.

En este caso se utilizarán las **cargas ponderadas**. Cada carga con su respectivo coeficiente en función del tipo de carga y de lo desfavorable que sea para la estructura.

Para comprobar el criterio de resistencia última del acero se debe analizar la sección de la estructura que soporta la tensión normal máxima. En este caso es la sección de empotramiento en la base de la torre.

$$\sigma_{max} \leq fyd = \frac{\sigma_e}{1,05}$$

Teóricamente, en una primera aproximación utilizamos la tensión normal debida al flector:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I} y_{max} = \frac{M}{W} \leq fyd = \frac{\sigma_e}{1,05}$$

Es preciso conocer el momento resistente de la sección tubular hueca:

$$W = \frac{\pi(R_e^4 - R_i^4)}{4R_e}$$

En última instancia para el dimensionamiento final teniendo en cuenta la tensión normal debida al momento flector debemos incluir también la tensión normal debida al axil:



$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \leq f_{yd} = \frac{\sigma_e}{1,05}$$

Ahora, manualmente, de esta expresión podemos despejar el límite elástico del acero si tenemos el diámetro como dato, o bien también podemos despejar el diámetro si tenemos el tipo de acero como dato.

También se podría dar el caso de tener ambas incógnitas e ir probando valores hasta que se cumpla esa inecuación para que el dimensionado sea correcto.

### 6.3. DIMENSIONADO

Llegado a este punto en el que tenemos definidas las tensiones máximas normales y cortantes, el criterio de resistencia y los coeficientes de seguridad a cumplir, se tienen como incógnitas de diseño el diámetro D, el espesor e y el tipo de acero.

Se procede al dimensionado con las expresiones anteriores de la torre fijando el diámetro D y posteriormente y tras analizar múltiples opciones se elige el tipo de acero para la estructura.

En este estudio para obtener muchos resultados rápidamente y compararlos para obtener la mejor opción se ha utilizado el **programa “MD SOLIDS”**.

La forma de trabajar ha sido analizando varias combinaciones de espesores y diámetros para así después analizando las deformaciones y tensiones máximas elegir el tipo de acero que interese.

También se ha calculado los esfuerzos y tensiones de forma “manual” resolviendo las ecuaciones anteriormente presentadas en la teoría.

Se adjunta el ANEXO 1 de cálculos.



### **PROGRAMA “MD SOLIDS”:**

Este programa de cálculo y diseño de estructuras ha sido utilizado durante la carrera. Consta de una ventana donde planteamos el problema, eligiendo una estructura o elemento estructural de estudio y aplicando las fuerzas y cargas deseadas. Posteriormente podemos ir variando las características físico-geométricas del elemento.

Los resultados que nos muestra corresponden a todos los cálculos relativos a resistencia del material, tensiones, esfuerzos... Además, los acompaña de diagramas de esfuerzos y deformaciones para la estructura y gráficas de análisis de tensiones en la sección de estudio.

#### **\*\*USO DE TABLAS DE PERFILES: \*\***

En este caso, al no tratarse de una estructura comercial, convencional. No tenemos los datos geométricos de la estructura tabulados. Esto es, debido a las grandes dimensiones y la variedad de cargas y condiciones ambientales que soporta la torre de un aerogenerador en cada localización.

Normalmente estas estructuras se realizan por encargo realizando un estudio por proyecto.

Se dimensiona con un procedimiento distinto a estructuras comerciales



## DIAGRAMAS DE ESFUERZOS

Se ha modelado la torre del aerogenerador como una viga empotrada libre.

Este programa no admite cargas variables a lo largo de una altura, entonces se ha optado por que la carga de viento se aproxime dividiendo en 20 intervalos de 5 metros la viga. En cada intervalo se ha colocado una carga distribuida con los datos tomados del perfil de fuerza de arrastre “ $F_d(z)$ ” para un diámetro de 5 metros. De esta manera, al transformar la fuerza de viento en una repartida para un  $D=5$  en intervalos de 5 metros se simplifica el diámetro aún desconocido con la distancia.

Ahora ya tenemos el perfil de fuerza de viento a lo largo del poste. En la parte superior, en la cota de cien metros, se ha añadido la fuerza de arrastre resultante que actúa sobre el conjunto palas-góndola reducida en un punto.

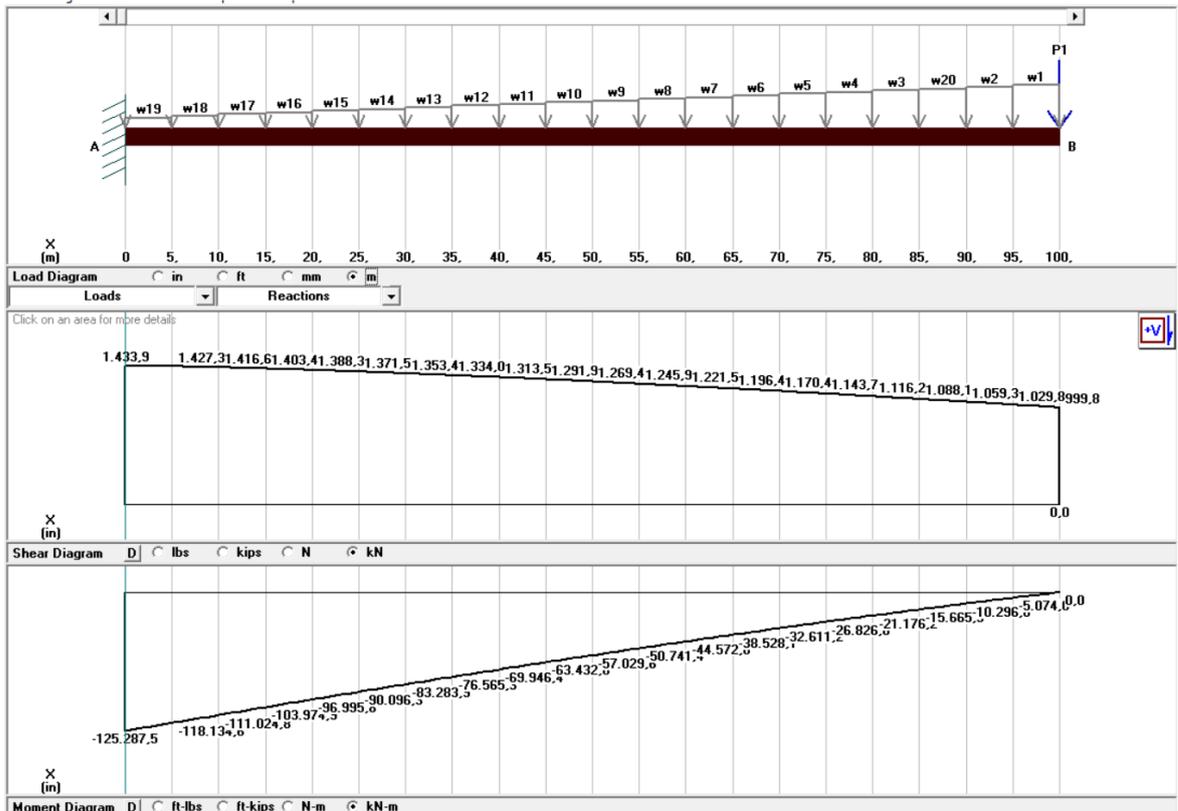


Ilustración 31: Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector sobre la torre.

Se muestran algunos ejemplos de trabajo con el programa, aunque se han hecho muchas más mediciones, de esta manera se aprecia la forma de trabajo:

Si fijamos el diámetro  $D=5\text{m}$  y varios espesores obtendremos el tipo de acero en cada caso.

**CASO D=5000mm, e=50mm:**

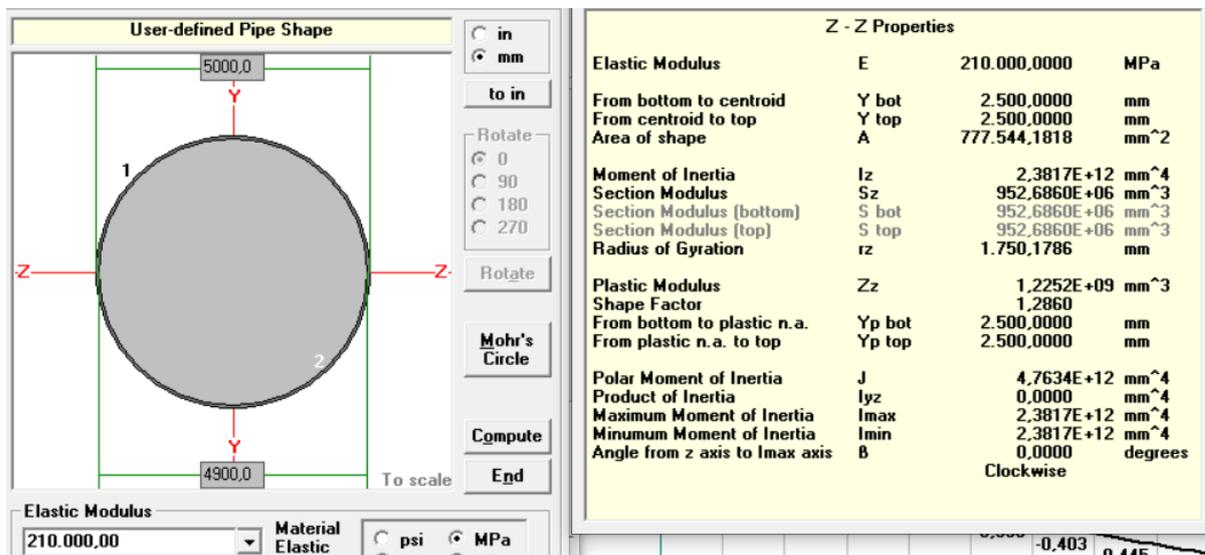


Ilustración 32: Datos físico-geométricos de la sección de la torre para un  $D=5000\text{mm}$  y  $e=50\text{mm}$ .

En el recuadro anterior tenemos las dimensiones de la sección de la torre del aerogenerador. Estas dimensiones diámetro y espesor son las que iremos modificando para calcular los esfuerzos que soporta la sección en cada caso.

Además, a la derecha se presentan las características físico-geométricas para esos datos de sección.

En el siguiente recuadro se muestran los gráficos de tensiones normales y tangenciales en la rebanada para la cota  $y=D$ , con los gráficos los vectores representan la dirección y la intensidad.

Se ha tenido en cuenta para la tensión normal el axil a compresión y el momento flector.

Estos gráficos son muy útiles para saber qué puntos de la sección van a estar más solicitados y por ello que partes de la sección son más susceptibles de rotura en cada caso de estudio.

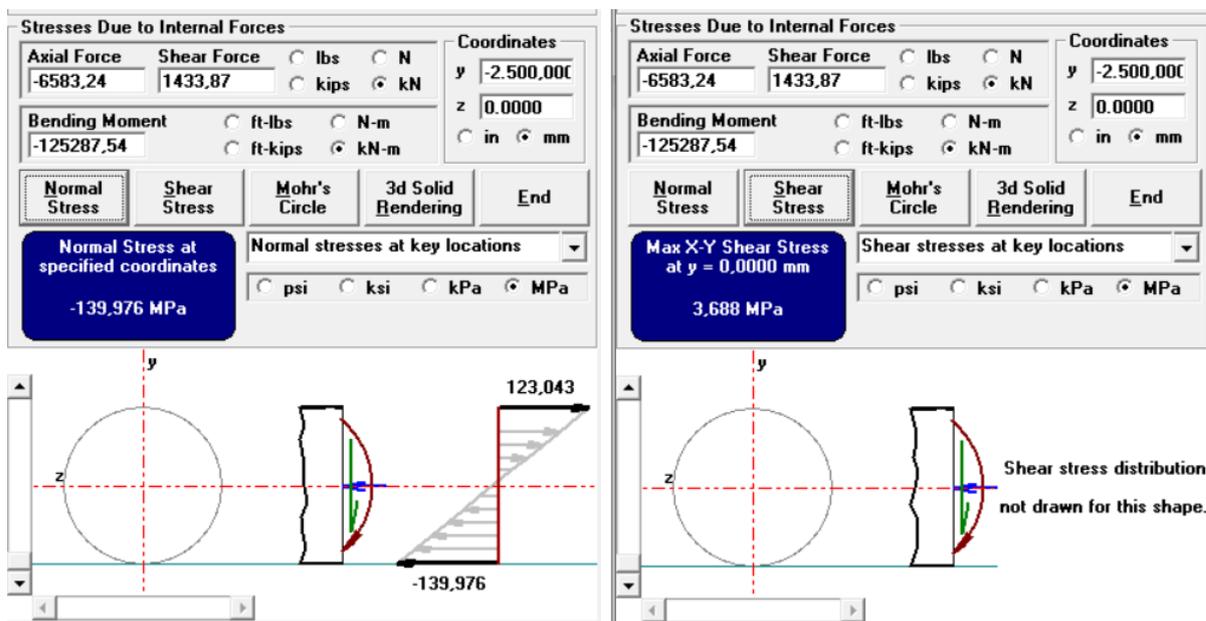


Ilustración 33: Gráficas de tensiones normales debidas al axil y al flector en la cota  $y=D$  para un  $D=5000\text{mm}$  y  $e=50\text{mm}$ .

Por último, en la tercera ilustración de cada caso queda representado los diagramas de deformaciones (giros y desplazamientos) de la estructura con cada valor, de esta forma se aprecia rápidamente que partes de la torre son más susceptibles de rotura por deformación. En este tipo de estructuras tan largas y esbeltas, esta rotura por deformación cobra especial importancia.



### DIAGRAMA DE DEFORMACIÓN:

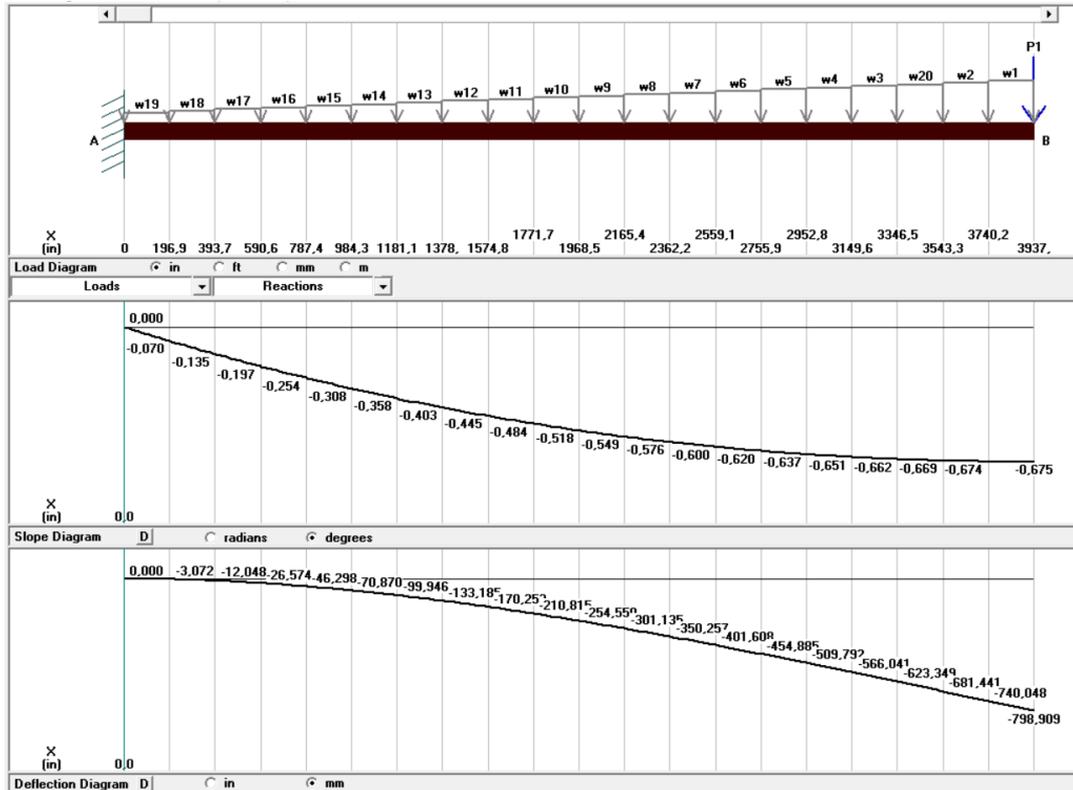


Ilustración 34: Diagramas de giros y desplazamientos de la torre a estudiar.



**CASO D=5000mm, e=25mm:**

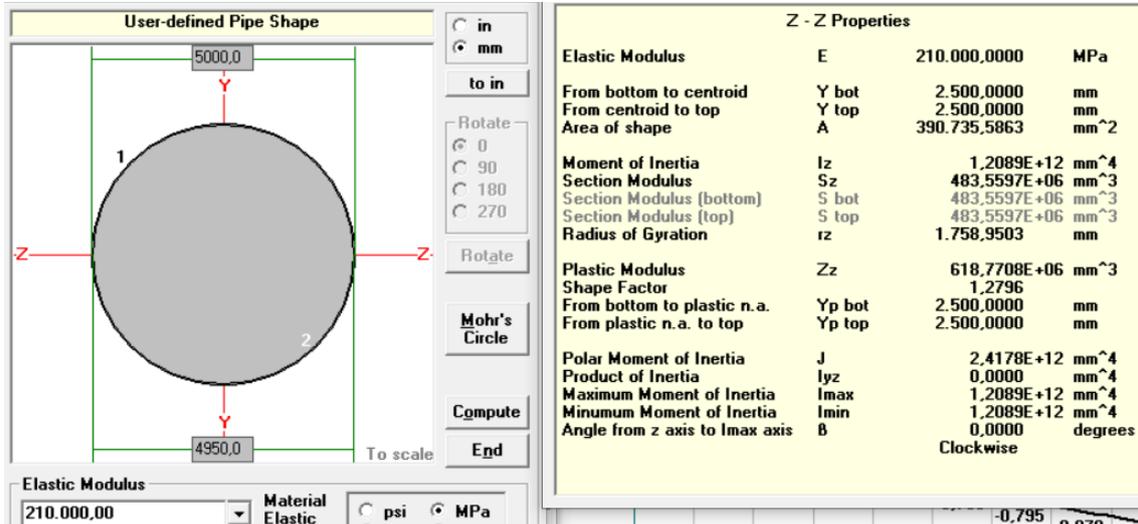


Ilustración 35: Datos físico-geométricos de la sección de la torre para un D=5000mm y e=25mm.

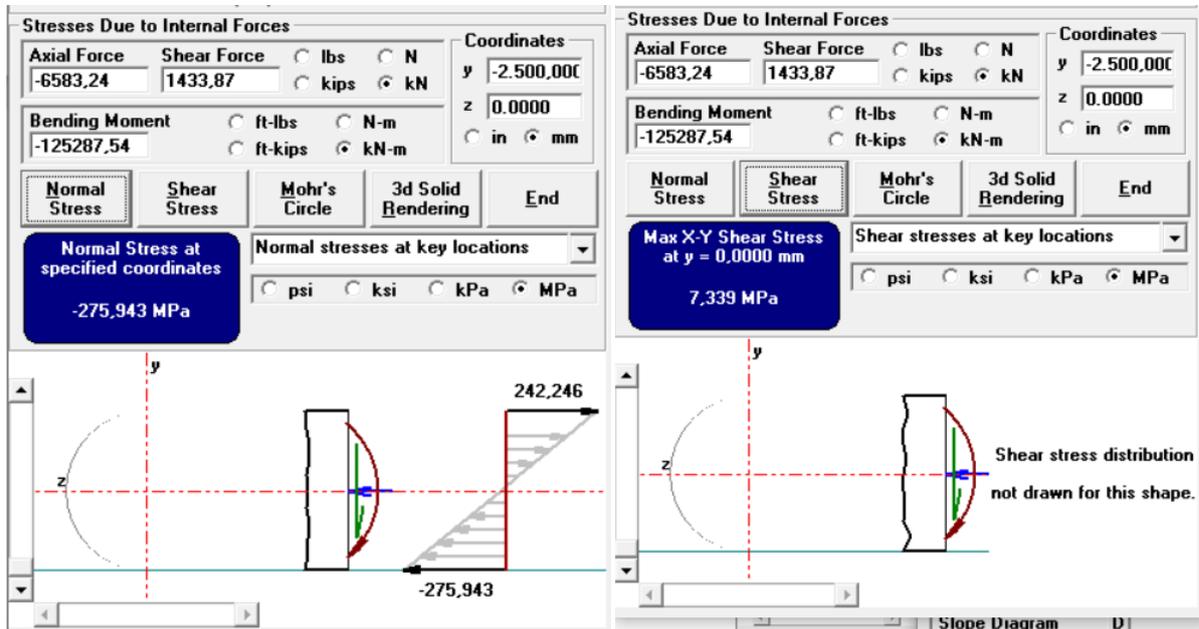


Ilustración 36: Gráficas de tensiones normales debidas al axil y al flector en la cota y= D para un D=5000mm y e=25mm



### DIAGRAMA DE DEFORMACIÓN

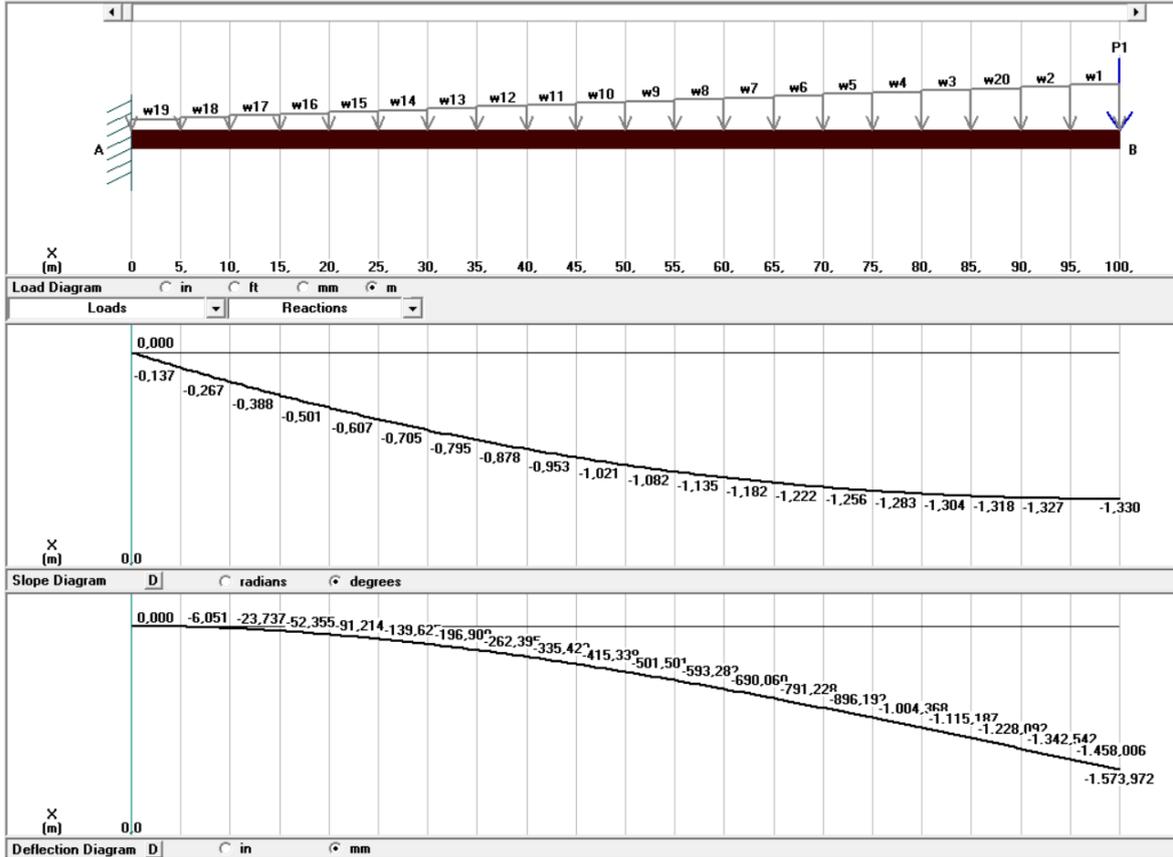


Ilustración 37: Diagramas de giros y desplazamientos de la torre a estudiar.

**CASO D=5000mm, e=12,5mm:**

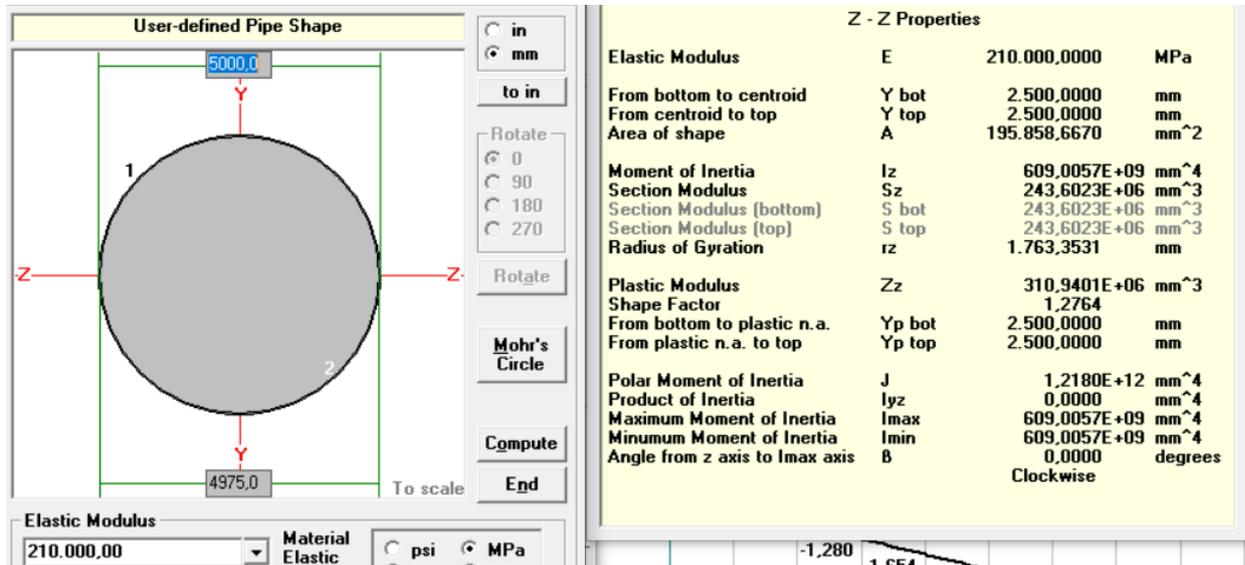


Ilustración 38: Datos físico-geométricos de la sección de la torre para un D=5000mm y e=12,5mm.

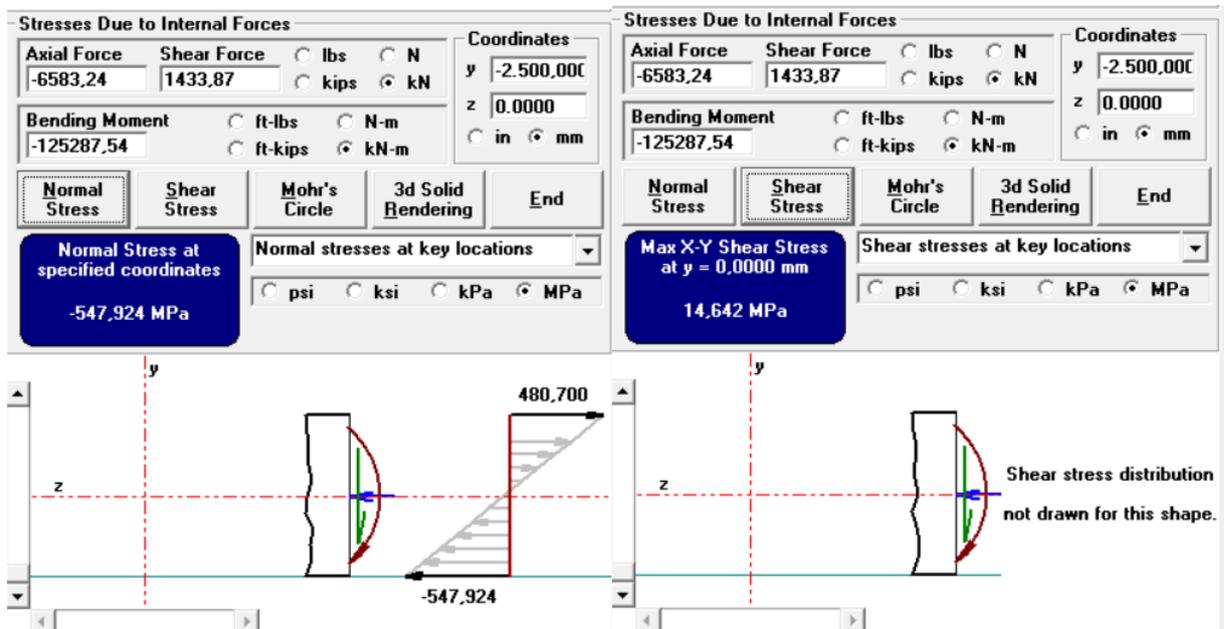


Ilustración 39: Gráficas de tensiones normales debidas al axil y al flector en la cota y= D para un D=5000mm y e=12,5mm



### DIAGRAMA DE DEFORMACIÓN

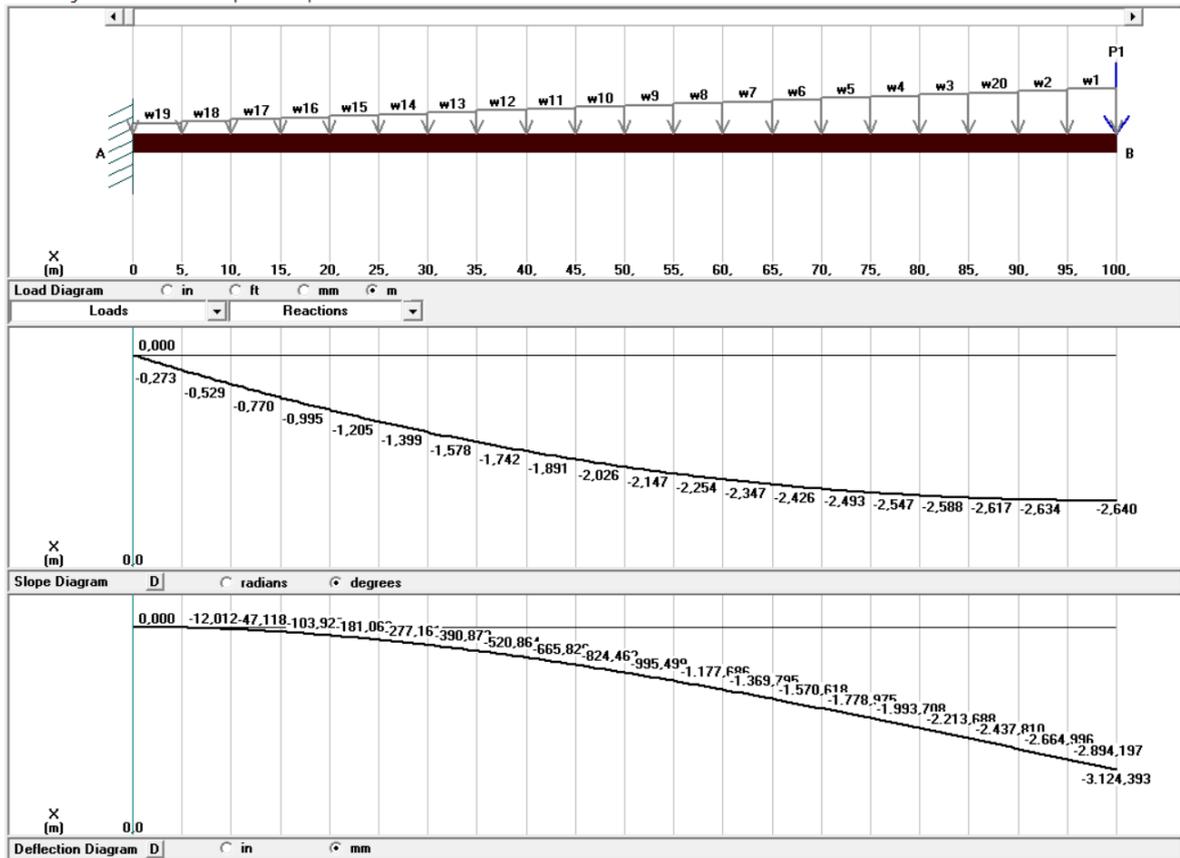


Ilustración 40: Diagramas de giros y desplazamientos de la torre a estudiar.



Además de esos tres casos presentados se han hecho multitud de iteraciones variando los datos geométricos de la sección. En los resultados de tensión normal máxima son todos valores a compresión para la sección de estudio. La tensión normal máxima está formada por el momento flector más el axil.

Resumen de todos los resultados con más iteraciones en el programa, de esta forma podemos comprobar rápidamente cómo varía la tensión máxima si variamos el diámetro y el espesor simultáneamente:

A	B	C	D	E
<b><math>\sigma</math> MAX (Mpa)</b>		<b>DIÁMETRO EXTERIOR(mm)</b>		
<b>ESPESOR(mm)</b>		<b>5000</b>	<b>5100</b>	<b>5200</b>
<b>12,5</b>		547,92	108,46	59,6
<b>25</b>		275,93	91,03	54,04
<b>50</b>		139,97	69,25	45,68
<b>75</b>		94,67	56,19	39,69
<b>100</b>		72,04	47,49	35,22
<b>150</b>		49,45	36,67	25,98

\*valores a compresión

Tabla 2: Resultados de tensión máx. para distintos diámetros y espesores

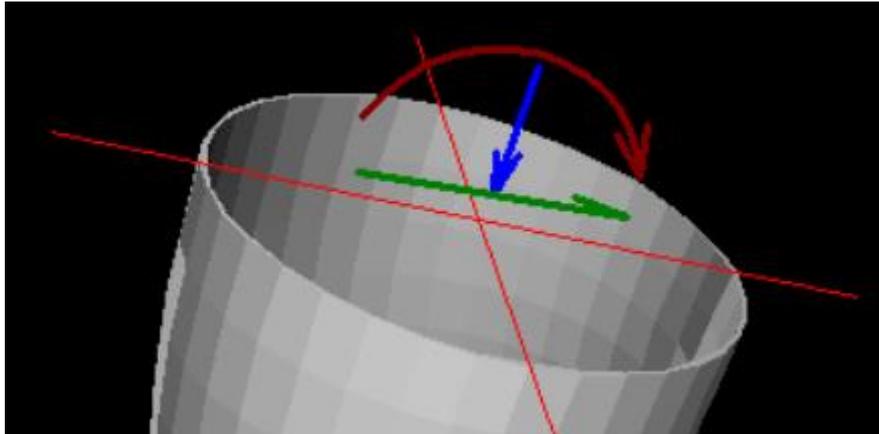
También se ha realizado otra tabla donde recoge la variación del desplazamiento máximo (en la parte más alta de la torre) variando el diámetro exterior y el espesor de la sección:

<b>DESPLAZAMIENTO <math>\delta</math>(mm)</b>	<b>DIÁMETRO EXTERIOR(mm)</b>		
<b>ESPESOR(mm)</b>	<b>5000</b>	<b>5100</b>	<b>5200</b>
<b>12,5</b>	3124,39	2943,75	2776,78
<b>25</b>	1573,97	1482,75	1398,45
<b>50</b>	798,9	752,38	709,4
<b>75</b>	540,69	509,05	479,83
<b>100</b>	411,68	387,475	365,13
<b>150</b>	334,36	314,6	296,34

Tabla 3: Resultados de máximo desplazamiento para distintos espesores y diámetros.



Se han recogido los datos relativos a la tensión normal máxima y el desplazamiento máximo porque en el cálculo final de los métodos estudiados anteriormente de ELU y ELS son los resultados que necesitamos.



*Ilustración 41: Rebanada de estudio con momento flector, esfuerzo axial y cortante*



## 6.4. RESULTADOS Y COMPROBACIONES FINALES

**Se ha elegido un  $D=5000\text{mm}$  y un espesor  $e=50\text{mm}$ :**

RESULTADOS CON PROGRAMA MD SOLIDS					
DIMENSIONES	Diámetro (mm)	Espesor(mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Inercia I <sub>z</sub> (mm <sup>4</sup> )	W (mm <sup>3</sup> )
	5.000	50	777.544,18	238170000000	9,53E+08
ESFUERZOS	Flector M (kNm)	Axil N (KN)	Cortante V (kN)		
	125.287,50	6.583,24	1.433,87		
POND.(X1,33)	166.632,38	8.755,71	1.907,05		
TENSIONES	$\sigma$ max (Mpa)	$\tau$ max (Mpa) cota Y=0	$\tau$ cota y=D (Mpa)	$\sigma_{eq}$ Von Mises	
	139,97	3,68	0	139,97	
PONDERADAS	186,1601	4,8944	0	186,1601	
DEFORMACION	$\delta$ horizontal (mm)				
	798,9				

Tabla 4: Resultados finales de MD SOLIDS para un  $D=5000\text{mm}$  y espesor  $e=50\text{mm}$

Estos resultados son los obtenidos mediante el programa MD SOLIDS.

Estos son los datos y resultados necesarios para realizar la comprobación de ELS y ELU para la sección elegida.

En este tipo de estructuras es preciso comenzar la comprobación por parte de ELS. Al tratarse de un elemento muy esbelto con una grandísima longitud, el estudio de flecha máxima o deformación es más determinante que el estudio a resistencia.



COMPARATIVA CON RESULTADOS MANUALES:

RESULTADOS CON FORMULAS MANUALES					
DIMENSIONES	Diámetro (mm)	Espesor(mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Inercia I <sub>z</sub> (mm <sup>4</sup> )	W (mm <sup>3</sup> )
	5.000	50	777.544,18	238170000000	9,53E+08
ESFUERZOS	Flector M (kNm)	Axil N (KN)	Cortante V (kN)		
	125.299,07	6.583,24	1.433,87		
POND.(X1,33)	166.647,77	8.755,71	1.907,05		
TENSIONES	$\sigma$ max (Mpa)	$\tau$ max (Mpa)	$\tau$ cota $y=D$ (Mpa)	$\sigma_{eq}$ Von Mises	
	139,98	3,68	0	139,98	
PONDERADAS	186,18	4,8944	0	186,18	
DEFORMACION	$\delta$ horizontal (mm)				
	798,9				

Tabla 5: Resultados finales manuales para un D=5000mm y espesor e=50mm

Si comparamos los resultados obtenidos con el programa, vemos que son prácticamente iguales a los manuales. Eso quiere decir que tenemos muy poco error y por ambos métodos ha sido correcto el cálculo.

Por ejemplo, el momento flector obtenido manualmente es de un valor de 125.299,07 frente al programa de 125.287,5.

- **COMPROBACIÓN ELS**

Con cargas y tensiones características:

Con el diámetro y espesor seleccionados, se ha obtenido el máximo desplazamiento horizontal del punto del centro de gravedad de la sección a una altura de 100m.

En el caso de voladizos se considerará como luz el doble del vuelo.

Se comprueba la flecha máxima:

$$f_{max} = 798,90 \text{ (mm)} \leq \frac{2L}{200} = 1000 \text{ (mm)}$$

Se cumple correctamente la premisa de flecha máxima localizada en el CTE documento de seguridad estructural.

- **COMPROBACIÓN ELU**

Punto crítico en la sección:

Se ha obtenido el diagrama tensión máxima debida al axil, momento y cortante.

Debido a la dirección en la que el axil, flector están aplicados apreciamos que la parte que más va a sufrir de la sección es la parte superior coincidiendo con el radio exterior.

En el diagrama se aprecia que en el punto P correspondiente al radio exterior, la tensión normal es la máxima, formada por el máximo flector y y axil. La tensión tangencial debido al cortante en ese punto es nula.

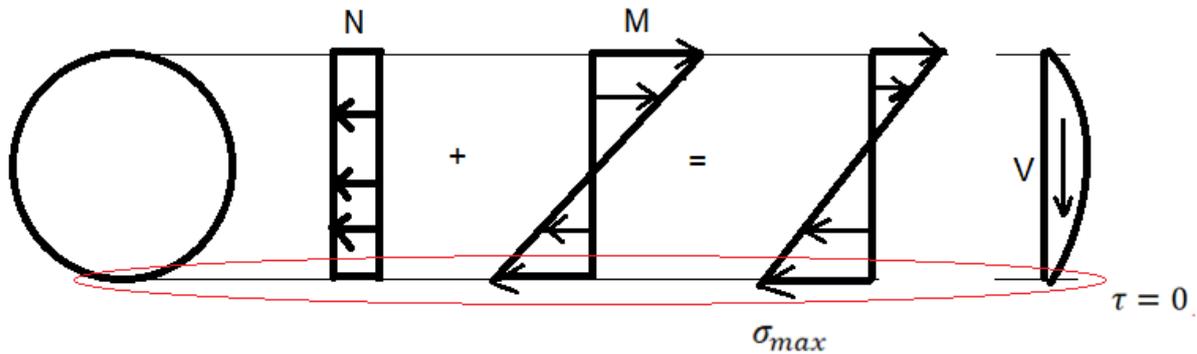


Ilustración 42: Sumatorio de tensiones normales debidas al momento flector y al esfuerzo axil y tensión tangencial debida al cortante.

#### Con cargas y tensiones ponderadas:

Sustituyendo, comprobamos que la tensión máxima debida al flector y axil cumple con el criterio anteriormente descrito:

$$\sigma_{max} = \frac{N *}{A} + \frac{M *}{I} y_{max} \leq f_{yd} = \frac{\sigma_e}{1,05}$$

$$\sigma_{max} = \frac{8755,1 * 10^3(N)}{777.554,18 (mm^2)} + \frac{166632,38 * 10^6(Nmm)}{952,686 * 10^6(mm^3)} = 186,167 (MPa)$$

$$186,167 (MPa) \leq f_{yd} = \frac{\sigma_e}{1,05}$$

$$\sigma_e = 1,05 * 186,167 = 195,476(MPa)$$

Por lo tanto, **según el CTE se tomará por seguridad y normativa el acero S235 especial J2.**



En la siguiente tabla se especifican todos los tipos de acero, recogidos en el CTE, documento básico de seguridad estructural SE-A.

En este caso de estudio al tener una aplicación fuera del ámbito comercial y por su localización y cargas que debe soportar lo hacen especial, se necesitará un acero de grado J2. Esto es, que tiene una aplicación en construcción con especiales exigencias de resistencia, resiliencia y soldabilidad.

**Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025**

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )			Tensión de rotura $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
<b>S235JR</b>					20
<b>S235J0</b>	235	225	215	360	0
<b>S235J2</b>					-20
<b>S275JR</b>					20
<b>S275J0</b>	275	265	255	410	0
<b>S275J2</b>					-20
<b>S355JR</b>					20
<b>S355J0</b>	355	345	335	470	0
<b>S355J2</b>					-20
<b>S355K2</b>					-20 <sup>(1)</sup>
<b>S450J0</b>	450	430	410	550	0

<sup>(1)</sup> Se le exige una energía mínima de 40J.

*Ilustración 43: CTE-SE-A Tipos de aceros*



## 6.5. MATERIAL DE LA TORRE

El material para utilizar va a ser un acero al carbono S235 del tipo J2 tipificado en el CTE. Consta de una chapa tubular de espesor de 100mm y diámetro exterior de 5000mm.

### ACERO S235 J2 PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS:

- módulo de Elasticidad: E	210.000 N/mm <sup>2</sup>
- módulo de Rigidez: G	81.000 N/mm <sup>2</sup>
- coeficiente de Poisson: $\nu$	0,3
- coeficiente de dilatación térmica: $\alpha$	$1,2 \cdot 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$
- densidad: $\rho$	7.850 kg/m <sup>3</sup>

Los aceros de Grado S 235 son aceros al carbono cuya composición corresponde a las normas DSTU 8539 y GOST 27772.

Tienen una buena resistencia, plasticidad, dureza, soldabilidad, rendimiento de estampado en frío y rendimiento de doblado en frío. como bielas, pasadores, ejes, tornillos, tuercas, anillos, soportes, soportes, estructuras de edificios, puentes, etc. *Aceros de alta resistencia a la tracción y al rendimiento para la construcción*

S235: Acero estructural con un límite de rendimiento mínimo especificado de 235MPa

J2: Prueba de impacto a baja temperatura inferior a 20 °C.



## 7. POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE ESTUDIO

El presente trabajo deja abiertas varias líneas de estudio en torno al tema de los aerogeneradores y su localización pudiendo ser onshore u offshore, también en lugar de estudiar un solo aerogenerador se podría analizar la mejor disposición de los aerogeneradores en un parque eólico y las interacciones entre ellos y el fluido que los rodea. Incluso alejándonos de la temática del presente trabajo pero también orientado a la ingeniería, sería el estudio de las líneas de evacuación de un parque eólico, de cada aerogenerador, sus interconexiones y la conexión a red.

### DISPOSICIÓN DE VARIOS AEROGENERADORES EN UN PARQUE:

Estudiar las relaciones que puedan tener varios aerogeneradores en diferentes posiciones puede resultar muy interesante. Las relaciones que se establecen entre los aerogeneradores y el fluido, las estelas que se forman al atravesar el fluido cada elemento, turbulencias asociadas. También analizar la forma más eficiente de colocar todos los aerogeneradores, el impacto ambiental.

*línea de estudio relacionada con ingeniería mecánica, energía, industrial, organización.*

### ANÁLISIS DE LAS LÍNEAS DE EVACUACIÓN:

Estudiar distintos diseños para optimizar la evacuación de la energía eléctrica a través de un circuito interno al parque eólico que interconexiona cada aerogenerador y luego la conexión de todo el parque a la red de distribución o de transporte a través del centro de transformación correspondiente, estudiar esquemas, celdas de entrada y de salida del parque, del CT. Líneas eléctricas y aparatación relacionada, protecciones...

*línea de estudio relacionada con ingeniería eléctrica.*



ESTUDIO DE LA TORRE DE UN AEROGENERADOR EN UNA SUPERFICIE FLOTANTE (offshore):

Una vez obtenidas todas las cargas y esfuerzos a soportar por la torre de este en un entorno marino, una posible alternativa de estudio podría ser el diseño de una estructura hueca y flotante que soporte las cargas y contrarreste la fuerza de arrastre en el aerogenerador, inclinaciones, materiales del mismo...

También hay que destacar que los aerogeneradores offshore requieren menos altura que los normales para obtener mismos rendimientos y potencias, estudiar alturas óptimas para colocar las góndolas.

Impacto ambiental, variación de vientos...

*línea de estudio relacionada con ingeniería mecánica, industrial, energía, organización.*



## CONCLUSIONES

Este proyecto ha servido para poner en contexto todo lo relativo a las energías renovables, los tipos de energías renovables y las tecnologías utilizadas actualmente. Acerca de la energía eólica se ha profundizado y en concreto, acerca de la infraestructura más utilizada, los aerogeneradores.

Se han abordado los estudios necesarios para llevar a cabo la elección de la mejor localización para este tipo de máquinas, viabilidad técnica y geográfica de una manera profesional.

También se ha hecho una caracterización y modelización del viento que se va a utilizar, y de las fuerzas a las que debemos hacer frente.

En cuanto al grueso del trabajo se ha basado en dimensionar de forma óptima la torre eólica para esas fuerzas determinadas cumpliendo con la normativa. Para ello, se han puesto en práctica conocimientos y métodos de cálculo aprendidos durante la carrera, así como programas para representar y calcular estructuras.

Una vez dimensionada la torre, se ha justificado todos los cálculos y comprobado que está diseñada de acuerdo con la normativa vigente, siguiendo procedimientos estudiados durante asignaturas del grado tanto técnicos como de seguridad estructural.

Se adjunta en los anexos ampliaciones relativas a cálculos utilizados y un estudio adicional acerca de la turbulencia que producen este tipo de estructuras al estar expuestas al viento.

Finalmente se han propuesto vías adicionales de estudio de diferentes alternativas relacionadas con este tema, para así continuar en un futuro estudiando este campo.

## BIBLIOGRAFÍA

Introducción, teoría energías renovables:

- [1]. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica> [Consultada hasta junio 2022]
- [2]. <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-eolica> [Consultada hasta junio 2022]

Ficha técnica rotor:

- [3]. [https://www.thewindpower.net/manufacturer\\_es\\_46\\_acciona.php](https://www.thewindpower.net/manufacturer_es_46_acciona.php) [Consultada hasta junio 2022]
- [4]. [https://www.acciona.com/es/soluciones/energia/areas-actividad/eolica/?\\_adin=02021864894](https://www.acciona.com/es/soluciones/energia/areas-actividad/eolica/?_adin=02021864894) [Consultada hasta junio 2022]
- [5]. Asociación empresarial eólica AEE
- [6]. <https://aeeolica.org/> [Consultada hasta noviembre 2022]

Estudio de localización:

- [7]. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-19066](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-19066) [Consultada hasta julio 2022]
- [8]. <https://globalwindatlas.info/es> [Consultada hasta julio 2022]

Clasificación tipos de viento

- [9]. UNE-EN IEC 61400-1 [Consultada hasta julio 2022]

Normativa técnica edificación:

- [10]. CTE <https://www.codigotecnico.org/> [Consultada hasta noviembre 2022]
- [11]. DB-SE (Documento Básico Seguridad estructural) [Consultada hasta noviembre 2022]
- [12]. DB-SE-A (Documento Básico de seguridad estructural Acero) [Consultada hasta noviembre 2022]
- [13]. DB-SE-AE (Documento Básico de seguridad estructural acciones en la edificación) [Consultada hasta noviembre 2022]
- [14]. Mecánica de fluidos:

[15] Mecánica de fluidos (Ingeniería) – 17 abril 2006, de ANTONIO CRESPO MARTINEZ [Consultada hasta noviembre 2022]

[16] <https://www.grc.nasa.gov> (desprendimiento capa limite cilindros) [Consultada hasta julio 2022]

Teoría de estructuras:

[17]. Prontuario básico de estructuras. [Consultada hasta julio 2022]

Programas ordenador:

[18].MD SOLIDS [Utilizado hasta noviembre 2022]

También en algún momento puntual se ha utilizado fuera de la bibliografía:

\* Temario y apuntes de la asignatura de “Elasticidad, resistencia y teoría de estructuras”. [Consultada hasta julio 2022]

\* Temario y apuntes de la asignatura de “Mecánica de fluidos”. [Consultada hasta julio 2022]



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS QUE SOPORTA UN AEROGENERADOR

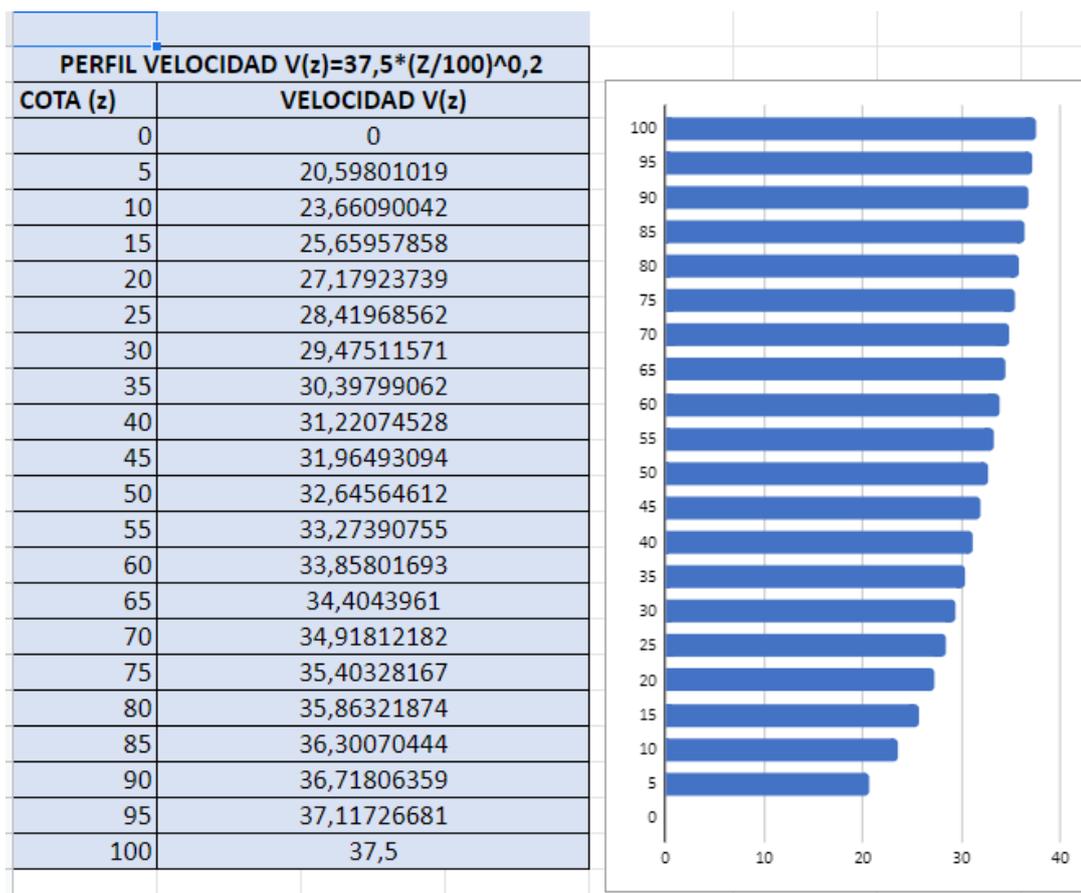
## ANEXOS

### ANEXO 1: CÁLCULOS

En este anexo se muestran todos los cálculos realizados para las fórmulas utilizadas durante todo el trabajo.

Estos cálculos se han realizado en una hoja de cálculo (adjunta) donde hubo que programar las fórmulas descritas. Esas expresiones se presentaron de forma teórica e inmediatamente después su resultado final, pero durante ese proceso se realizaron diversos cálculos que se muestran a continuación:

Cálculos relativos a las iteraciones del perfil de velocidad de viento, así como las gráficas que lo ilustran de forma cuantitativa:





En la siguiente tabla se calculan los resultados de fuerza de arrastre o resistencia aerodinámica del viento sobre el poste a cada cota  $z$ , y el momento resultante en cada cota  $z$ .

En este caso se presentan en función del diámetro  $D$  aún por diseñar:

VIENTO VARIABLE SEGÚN COTA $z$ (EN FUNCION DE $D$ )			
COTA ( $z$ ) (m)	Velocidad viento ( $z$ ) (m/s)	FUERZA ARRASTRE VIENTO $F_d(z)$ (kN)* $D$	M( $z$ ) = $M_{Rotor}$ + $M_{Viento}(z)*D$ (kNm)
0	0	0	99976,029+5064,609D
5	20,59801019	1,3098D	99976,029+4477,98D
10	23,66090042	3,4564D	99976,029+3933,01D
15	25,65957858	6,0976D	99976,029+3428,88D
20	27,17923739	9,1216D	99976,029+2964,57D
25	28,41968562	12,46651D	99976,029+2539,18D
30	29,47511571	16,0916D	99976,029+2151,697D
35	30,39799062	19,9675D	99976,029+1801,1D
40	31,22074528	24,07205D	99976,029+1486,3D
45	31,96493094	28,3875D	99976,029+1206,19D
50	32,64564612	32,8993D	99976,029+959,56D
55	33,27390755	37,5956D	99976,029+745,17D
60	33,85801693	42,466D	99976,029+561,68D
65	34,4043961	47,5015D	99976,029+407,67D
70	34,91812182	52,6946D	99976,029+281,602D
75	35,40328167	58,0383D	99976,029+181,803D
80	35,86321874	63,5266D	99976,029+106,418D
85	36,30070444	69,15373D	99976,029+53,353D
90	36,71806359	74,9149D	99976,029+20,162D
95	37,11726681	80,8057D	99976,029+38,2D
100	37,5	86,8219D	0



Ahora en el siguiente paso, se muestra la tabla donde se ha calculado lo anterior para un diámetro de 5 m, el tamaño elegido para el diseño. También se presentan los resultados ponderados:

VIENTO VARIABLE SEGÚN COTA z				PONDERADAS (x1,5)	
COTA (z) (m)	Velocidad viento (z) (m/s)	FUERZA ARRASTRE VIENTO Fd(z) (kN)	M(z) = MRotor+ MViento(z) (kNm)	Fd(z) POND	M(z) POND
0	0	0	125299,074	0	187948,611
5	20,59801019	6,549	122365,929	9,8235	183548,893
10	23,66090042	17,282	119641,079	25,923	179461,618
15	25,65957858	30,488	117120,429	45,732	175680,643
20	27,17923739	45,608	114798,879	68,412	172198,318
25	28,41968562	62,33255	112671,929	93,498825	169007,893
30	29,47511571	80,458	110734,514	120,687	166101,771
35	30,39799062	99,8375	108981,529	149,75625	163472,293
40	31,22074528	120,36025	107407,529	180,540375	161111,293
45	31,96493094	141,9375	106006,979	212,90625	159010,468
50	32,64564612	164,4965	104773,829	246,74475	157160,743
55	33,27390755	187,978	103701,879	281,967	155552,818
60	33,85801693	212,33	102784,429	318,495	154176,643
65	34,4043961	237,5075	102014,379	356,26125	153021,568
70	34,91812182	263,473	101384,039	395,2095	152076,058
75	35,40328167	290,1915	100885,044	435,28725	151327,566
80	35,86321874	317,633	100508,119	476,4495	150762,178
85	36,30070444	345,76865	100242,794	518,652975	150364,191
90	36,71806359	374,5745	100076,839	561,86175	150115,258
95	37,11726681	404,0285	100167,029	606,04275	150250,543
100	37,5	434,1095	0	651,16425	0

DIÁMETRO	5
----------	---

También se ha calculado una tabla de 20 intervalos de 5 metros cada uno, que se utilizó para aproximar la fuerza variable del viento a lo largo de la torre para poder utilizar el programa “MD SOLIDS”. El término de las diferencias es para introducir el valor de cada intervalo:

Fd REPARTIDA (kN/m)	DIFERENCIAS
0	0
1,3098	1,3098
3,4564	2,1466
6,0976	2,6412
9,1216	3,024
12,46651	3,34491
16,0916	3,62509
19,9675	3,8759
24,07205	4,10455
28,3875	4,31545
32,8993	4,5118
37,5956	4,6963
42,466	4,8704
47,5015	5,0355
52,6946	5,1931
58,0383	5,3437
63,5266	5,4883
69,15373	5,62713
74,9149	5,76117
80,8057	5,8908
86,8219	6,0162

Estos valores representan la carga repartida en el programa



A continuación, se presentan las tablas-resumen de los cálculos e iteraciones del programa para obtener la tensión máxima debido al flector y al axil y el máximo desplazamiento variando la geometría de la sección:

$\sigma$ MAX (Mpa)	DIÁMETRO EXTERIOR(mm)			DESPLAZAMIENTO $\delta$ (mm)	DIÁMETRO EXTERIOR(mm)		
ESPELOR(mm)	5000	5100	5200	ESPELOR(mm)	5000	5100	5200
12,5	547,92	108,46	59,6	12,5	3124,39	2943,75	2776,78
25	275,93	91,03	54,04	25	1573,97	1482,75	1398,45
50	139,97	69,25	45,68	50	798,9	752,38	709,4
75	94,67	56,19	39,69	75	540,69	509,05	479,83
100	72,04	47,49	35,22	100	411,68	387,475	365,13
150	49,45	36,67	25,98	150	334,36	314,6	296,34

\*valores a compresión

Finalmente, se muestra la tabla donde se recogen los valores finales para el caso de geometría elegido. En cada casilla está programada la expresión para obtener cada resultado:

RESULTADOS CON FORMULAS MANUALES					
DIMENSIONES	Diámetro (mm)	Espesor(mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Inercia Iz (mm <sup>4</sup> )	W (mm <sup>3</sup> )
	5.000	50	777.544,18	238170000000	9,53E+08
ESFUERZOS	Flector M (kNm)	Axil N (KN)	Cortante V (kN)		
	125.299,07	6.583,24	1.433,87		
POND.(X1,33)	166.647,77	8.755,71	1.907,05		
TENSIONES	$\sigma$ max (Mpa)	$\tau$ max (Mpa)	$\tau$ cota y=D (Mpa)	$\sigma_{eq}$ Von Mises	
	139,98	3,68	0	139,98	
PONDERADAS	186,18	4,8944	0	186,18	
DEFORMACION	$\delta$ horizontal (mm)				
	798,9				

RESULTADOS CON PROGRAMA MD SOLIDS					
DIMENSIONES	Diámetro (mm)	Espesor(mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Inercia Iz (mm <sup>4</sup> )	W (mm <sup>3</sup> )
	5.000	50	777.544,18	238170000000	9,53E+08
ESFUERZOS	Flector M (kNm)	Axil N (KN)	Cortante V (kN)		
	125.287,50	6.583,24	1.433,87		
POND.(X1,33)	166.632,38	8.755,71	1.907,05		
TENSIONES	$\sigma$ max (Mpa)	$\tau$ max (Mpa) cota Y=0	$\tau$ cota y=D (Mpa)	$\sigma_{eq}$ Von Mises	
	139,97	3,68	0	139,97	
PONDERADAS	186,1601	4,8944	0	186,1601	
DEFORMACION	$\delta$ horizontal (mm)				
	798,9				

Para finalizar este anexo se adjunta el enlace al documento de la hoja de cálculo.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/10JsRuzVbZ1t9PfwLBR8KQ8qXB4v\\_mLIQ/edit#gid=1908225092](https://docs.google.com/spreadsheets/d/10JsRuzVbZ1t9PfwLBR8KQ8qXB4v_mLIQ/edit#gid=1908225092)



## ANEXO 2: AMPLIACIÓN DE LA TURBULENCIA EN UNA TORRE EÓLICA.

### TURBULENCIAS EN TORNO A LOS AEROGENERADORES

En términos de la dinámica de fluidos, turbulencia o flujo turbulento es un régimen de flujo caracterizado por baja difusión de momento, alta convección y cambios espacio-temporales rápidos de presión y velocidad. Los flujos no turbulentos son también llamados flujos laminares. Un flujo se puede caracterizar como laminar o turbulento observando el orden de magnitud del número de Reynolds.

En este caso de estudio de la torre eólica, este análisis de turbulencia se centrará en torno a la torre del aerogenerador.

### CARACTERÍSTICAS DE UN FLUJO TURBULENTO

No existe una definición exacta de la turbulencia sin embargo en general, todo el mundo tiene una idea de lo que es un movimiento turbulento, cualquiera podría describirlo como un movimiento fluctuante y desordenado y sabría, con poco margen de error, distinguirlo de un movimiento laminar.

#### **Irregularidad.**

Quizás sea la característica más evidente para cualquier observador. La irregularidad se presenta tanto en el espacio como en el tiempo y de magnitudes fluidodinámicas tales como la velocidad, la presión, la temperatura y la composición. Estas irregularidades espaciales y temporales tienen características propias que no se corresponden con las del ruido. A pesar de ser un fenómeno determinista, los flujos turbulentos parecen irregulares, caóticos e impredecibles, lo que justifica el uso de métodos estadísticos para su estudio.



### **Tienen lugar a altos Reynolds.**

La turbulencia aparece siempre cuando el número de Reynolds característico del problema ( $Re=DV/\nu$ ) es muy grande. De hecho, es uno de los parámetros que se utilizan para distinguir entre flujo laminar y turbulento. La turbulencia frecuentemente se origina como una inestabilidad de los flujos laminares. Del análisis de la estabilidad de soluciones de flujos laminares se evidencia que la solución se hace inestable a partir de un cierto valor del número de Reynolds, denominado valor crítico.

### **Los fenómenos de transporte se incrementan.**

Los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía se ven notablemente amplificados por efecto de la turbulencia. Esto se debe a las fluctuaciones del movimiento turbulento. Si bien estas fluctuaciones tienen lugar a escalas mucho mayores que la escala molecular producen, sin embargo, efectos difusivos semejantes a los moleculares (al menos cualitativamente) de ahí que a esta propiedad se la conozca en alguna literatura como difusividad.

### **Disipación.**

Los flujos turbulentos siempre son disipativos. Una vez que el flujo se ha constituido en turbulento, la turbulencia tiende a mantenerse, aunque para ello necesita de un aporte continuo de energía. Esta energía la extrae de la energía cinética de movimiento turbulento y la invierte en aumentar la energía interna mediante procesos de deformación a los que se ven sometidas las partículas fluidas. La turbulencia necesita de una transferencia continua de energía para reponer estas pérdidas viscosas. Si no existe suministro de energía la turbulencia decae rápidamente.

### **Tridimensionalidad.**

Los movimientos turbulentos son siempre rotacionales y tridimensionales. La turbulencia se caracteriza por los altos niveles de fluctuación de la vorticidad. Las fluctuaciones aleatorias de la vorticidad no podrían mantenerse si las fluctuaciones de la vorticidad fuesen bidimensionales, debido a que un mecanismo importante para el mantenimiento de la vorticidad conocido como alargamiento de torbellinos, no puede ocurrir en flujos bidimensionales. Pueden existir flujos



turbulentos que al ser promediados en el tiempo resulten ser planos. Incluso pueden existir movimientos turbulentos en los que las escalas más grandes de la turbulencia sean fundamentalmente bidimensionales, sin embargo, a medida que se descende en el tamaño de las escalas dentro del amplio espectro que caracteriza a la turbulencia, se encuentra que el movimiento asociado a estas escalas pequeñas es siempre tridimensional.

## CALLE DE TORBELLINOS DE VON KÁRMÁN

Una calle de vórtices de Von Kármán, también conocidos como torbellinos de Von Kármán es un patrón que se repite de vórtices en remolino causados por la separación no estacionaria de la capa de fluido al pasar sobre cuerpos sumergidos. Estos vórtices o torbellinos repetitivos son los responsables de fenómenos tales como el sonido por vibración de líneas telefónicas o líneas eléctricas suspendidas y la vibración de la antena de un automóvil a ciertas velocidades.



Las calles de vórtices de Von Kármán ocurren solo cuando el número de Reynolds ( $Re$ ) registra ciertos valores, por lo general superiores a 90.

$$Re = \frac{ud}{\nu} \qquad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:



- $d$  = diámetro cilindro.
- $u$  = Velocidad constante del flujo en dirección al cilindro
- $\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido.
- $\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido de la corriente libre
- $\rho$  = Densidad de referencia del fluido.

El rango de valores de  $Re$  oscilará según el tamaño y la forma del cuerpo a partir del cual se producen los vórtices así como de sus corrientes contrarias, es decir sus *eddies* o remolinos, lo mismo que en función de la viscosidad cinemática del fluido. Cuando se trata de rangos elevados de  $Re$  ( $47 < Re < 10^7$  para cilindros circulares), se producen *eddies* en cada lado del cuerpo, formando dos filas de vórtices en su estela, cuyos centros se alternan, quedando en cada fila situados en una posición intermedia con respecto a los de la otra. Por último, la energía se consume por la viscosidad y el patrón se dispersa en función de la distancia de la fuente.

### FRECUENCIA DE TORBELLINOS

Cuando se considera un largo cilindro circular, la frecuencia de la producción de vórtices se determina según la siguiente relación empírica:

$$\frac{fd}{u} = 0.198 \left( 1 - \frac{19.7}{Re} \right)$$

Esta fórmula es en general correcta para rangos de  $250 < Re < 2 \times 10^5$